

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО  
ПРОСТОРУ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ЄГОРОВ ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396.96:004.94

**ДИСЕРТАЦІЯ**

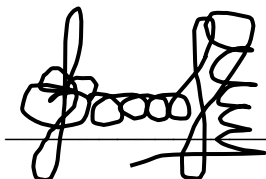
**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОМОНІТОРИНГУ В  
СИСТЕМАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

122 – «Комп'ютерні науки»

Галузь знань 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



В. О. ЄГОРОВ

Науковий керівник:

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

Сгоров В.О. Інформаційні технології радіомоніторингу в системах супутникового зв'язку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національна академія наук України, Київ, 2025.

У сучасних умовах стрімкого розвитку засобів зв'язку та його впливу на ведення бойових дій, системи супутникового зв'язку набули винятково важливого значення на тактичному, оперативному, стратегічному рівнях. ССЗ забезпечують захищене, завадостійке, багатоканальне передавання інформації та стали критично важливими компонентами військової інфраструктури та національної безпеки. Зокрема, досвід сучасних військових конфліктів (в тому числі війни в Україні) демонструє зростання ролі космічного сегменту у забезпеченні бойових операцій.

Водночас гостро постає проблема забезпечення ефективного радіомоніторингу каналів супутникового зв'язку. Ефективність цього процесу визначається повнотою охоплення потрібних каналів, достовірністю отриманих даних та оперативністю реагування на зміни обстановки. На практиці можливості засобів радіомоніторингу обмежені: кількість одночасно доступних постів і технічних комплексів, час переналаштування приймального обладнання, діапазон частот та енергетичні ресурси – усе це не дозволяє охопити спостереженням всю сукупність супутникових каналів зв'язку. Проблема особливо ускладнюється з огляду на тенденції збільшення кількості діючих супутників і каналів, ускладнення сигналів та застосування алгоритмів їх маскування і шифрування, що підвищує вимоги до засобів моніторингу.

Крім того, в реальних умовах часто має місце апріорна невизначеність – відсутність повної та точної інформації про параметри супутникових каналів,

їх прив'язку до конкретних космічних апаратів, режими роботи передавачів, ступінь інформативності переданих даних тощо. В таких умовах прийняття рішення щодо розподілу наявних засобів радіомоніторингу ускладнене: воно повинно здійснюватися на основі обмеженої, неповної або нечіткої інформації. Проте наразі на більшості постів радіомоніторингу планування і розподіл ресурсів виконуються вручну, без достатнього використання сучасних інформаційних технологій та алгоритмів підтримки рішень. Це призводить до затримок і суб'єктивності у реагуванні, що є неприпустимим у швидкоплинних бойових умовах, коли на прийняття рішення інколи є лічені хвилини. Отже, актуальним науково-практичним завданням є розробка автоматизованих методів раціонального розподілу наявних засобів радіомоніторингу, здатних працювати в реальному часі та враховувати невизначеність обстановки.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є створення спеціалізованої інформаційної системи автоматизованого планування і розподілу ресурсів радіомоніторингу ССЗ на основі методів штучного інтелекту та нечіткої логіки. Нечіткі підходи дозволяють формалізувати експертні знання, оперувати лінгвістичними оцінками і приймати обґрунтовані рішення за неповної інформації. Об'єднання теорії нечітких множин з методами математичного програмування та інтелектуального аналізу даних дасть змогу досягти балансу між повнотою охоплення каналів, достовірністю прийнятих рішень і швидкістю реагування на зміни обстановки. Відтак тема дисертаційної роботи, присвяченої автоматизованому розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку, є актуальною з точки зору як наукового значення, так і практичної потреби.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову проблему — підвищення оперативності та обґрунтованості процесу розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження за каналами систем супутникового зв'язку (ССЗ) в умовах обмеженого ресурсу та апіорної невизначеності. Запропоновано комплексне теоретико-методичне та алгоритмічне

забезпечення, реалізоване у вигляді інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів, що функціонує на основі нечіткої логіки та математичного програмування.

Мета роботи полягає у підвищенні оперативності та ефективності процесу розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження за каналами зв'язку ССЗ в умовах невизначеності параметрів супутників і режимів їх роботи. Досягнення поставленої мети забезпечується шляхом розроблення і впровадження нового науково-методичного апарату та програмних засобів підтримки прийняття рішень для автоматизованого планування радіомоніторингу. Тобто, створення такої системи та методики розподілу ресурсів, яка дозволить максимально швидко й обґрунтовано визначати, які саме супутникові канали треба моніторити в першу чергу, забезпечивши тим самим повніше охоплення важливих каналів наявними технічними засобами.

Для досягнення цієї мети в дисертації вирішено комплекс основних завдань:

1. Проаналізувати існуючі підходи до ведення радіомоніторингу систем супутникового зв'язку (зокрема в Україні), визначити проблемні аспекти та вимоги до вдосконалення цього процесу.

2. Розробити математичну модель оптимального розподілу засобів радіомоніторингу, що враховує фактори апріорної невизначеності та динамічності обстановки.

3. Сформулювати систему показників та методику оцінювання важливості (пріоритетності) каналів супутникового зв'язку з урахуванням їхньої доступності, інформативності та технічних характеристик, яка б дозволила ранжувати канали за ступенем важливості для моніторингу.

4. Розробити принципи функціонування та архітектуру інформаційної системи підтримки прийняття рішень для автоматизованого планування і розподілу засобів радіомоніторингу.

5. Реалізувати прототип інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів, здійснити його програмну верифікацію (тестування на

модельних даних) та оцінити ефективність запропонованих рішень у порівнянні з традиційними підходами.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, предмет і об'єкт дослідження, визначено наукові завдання, методологічну базу, елементи наукової новизни, практичного значення та апробації результатів.

У **першому розділі** висвітлено сучасний стан та значення супутникового зв'язку в системах цивільного та військового призначення. Наведено огляд сучасного стану систем супутникового зв'язку та їх ролі у інформаційних мережах. Зокрема, розглянуто функції ССЗ у забезпеченні зв'язку, навігації, передачі даних радіомоніторингу та інших важливих напрямів, що підтверджує їхнє значення. Відзначено тенденції розвитку супутникових систем, зокрема збільшення їх пропускної здатності, надійності та інтеграції з іншими інформаційними системами. Проаналізовано, як ці тенденції впливають на завдання радіомоніторингу: з одного боку, зростає обсяг трафіку й кількість каналів, що підлягають моніторингу, з іншого – ускладнюються умови прийому сигналів через появу новітніх технологій (спектральне розсіювання, адаптивні методи модуляції, тощо).

Розглянуто критерії та показники оцінювання ефективності радіомоніторингу. Встановлено, що існуючі методики розподілу не враховують неповноту вхідних даних, не адаптовані до умов невизначеності, а сам розподіл здебільшого здійснюється вручну.

Сформульовано наукову проблему: створити методичну основу та інструментальний засіб для автоматизованого, обґрунтованого та оперативного розподілу засобів спостереження за ССЗ.

У **другому розділі** на основі аналізу завдань розподілу засобів обґрунтовано доцільність використання методів математичного програмування в поєднанні з теорією нечітких множин.

Здійснено теоретичне обґрунтування вибору математичного апарату для оптимізації розподілу засобів радіомоніторингу. Розглянуто різні підходи: класичні методи оптимального планування, стохастичні моделі, а також

інтелектуальні методи (експертні системи, нейронні мережі, нечітка логіка). Проаналізовано, що традиційні оптимізаційні моделі важко застосувати через високу динамічність і невизначеність вихідних даних – наприклад, складно скласти детерміновану цільову функцію, яка б точно відображала критерії ефективності в реальному часі. Стохастичні моделі теж мають обмеження, оскільки ймовірнісні характеристики сигналів і режими роботи каналів зв'язку невідомі або змінюються. Нечітка логіка обрана як основа методичного апарату з огляду на її здатність працювати з лінгвістичними змінними і невизначеними поняттями (такими як "висока інформативність каналу" чи "низька якість сигналу"), а також легко інтегрувати експертні знання у вигляді правил. Зазначено, що ефективним підходом є поєднання нечіткої логіки з елементами математичного програмування: нечіткі модулі визначають гнучкі коефіцієнти та пріоритети, які далі використовуються в оптимізаційній процедурі розподілу ресурсів. Такий гібридний підхід – нечітке математичне програмування – дає змогу отримати план розподілу, стійкий до неповних даних і адаптивний до змін.

Здійснено математичне моделювання процесу оптимального розподілу засобів радіомоніторингу. Сформульовано модель у вигляді задачі оптимізації на кожному кроці планування та вона представлена як динамічна оптимізаційна задача, де критерій оптимальності гнучко змінюється залежно від нечітких оцінок важливості каналів і стану ресурсів. Для розв'язання цієї задачі застосовано ітераційний алгоритм: на кожному кроці виконується оцінка важливостей каналів, далі – розв'язання оптимізаційної підзадачі розподілу, після чого система переходить до наступного інтервалу з оновленими даними. Запропоновано рекурентні співвідношення для оновлення оцінок важливості, що забезпечує адаптивність моделі. Сформульовано математичну постановку задачі розподілу як оптимізаційної, з урахуванням кількох критеріїв (інформативність, доступність, важливість каналів). Вперше використано функції належності, логіку Сааті для побудови нечіткої функції вигоди.

Описано розробку структури інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу. Запропоновано архітектуру програмно-апаратного комплексу, що реалізує автоматизоване планування.

Запропонована модель дозволяє враховувати не лише кількісні параметри, але й експертні оцінки, представлені у вигляді лінгвістичних шкал, що особливо важливо в умовах інформаційної невизначеності.

У **третьому розділі** запропоновано нову методику оцінювання важливості супутникових каналів, яка враховує:

- втрати енергії сигналу в атмосфері;
- структурну доступність каналів;
- показники інформативності;
- інтеграцію в єдину оцінку через агрегування на основі вагових коефіцієнтів.

Використано методи рангових і бальних оцінок, нечітку класифікацію каналів, формалізовано процес побудови вагових коефіцієнтів. У результаті побудовано функцію важливості, яка використовується як критерій у задачі оптимального розподілу.

У **четвертому розділі** розроблено програмну реалізацію інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу та здійснено вибір, обґрунтування методів та критеріїв оцінювання ефективності функціонування інформаційної системи. Описано структуру нечіткого логічного контролера: наведено основні функції, які виконують нечіткий висновок (фазифікація вхідних значень показників, застосування правил з бази знань, дефазифікація для отримання числового значення важливості). Описано архітектуру, структуру бази знань, блоки нечіткого виведення, механізми навчання та донавчання. Система реалізує адаптивне управління розподілом у реальному часі. Проведено експериментальну перевірку її ефективності.

Експерименти засвідчили, що застосування ІС дозволяє:

- зменшити час прийняття рішення на більш ніж 3%;

- підвищити ймовірність правильного розподілу з 0.68 до 0.82;
- підвищити інверсну ефективність на 70 %;
- забезпечити стабільне охоплення супутникових каналів без збільшення ресурсів.

Наукова новизна полягає у тому, що вперше запропоновано математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу як ітераційний процес, що враховує фактори невизначеності та багатокритеріальність, та запропоновано методику оцінювання важливості каналів із урахуванням множинних факторів.

Вперше реалізовано інформаційну систему автоматизованого розподілу засобів з підтримкою донавчання, адаптації та нечіткої логіки.

Результати роботи реалізовані у вигляді інформаційної системи, що може бути інтегрована у пости радіомоніторингу. Система придатна для роботи в умовах динамічної оперативної обстановки та може застосовуватись в інших сферах - управління безпілотними платформами, розподіл сенсорних мереж тощо.

Розроблені моделі, алгоритми та методики також можуть використовуватись у навчальному процесі в межах дисциплін, пов'язаних з оптимізацією, системним аналізом та технічним забезпеченням радіомоніторингу.

**Ключові слова:** інформаційні технології, підтримки прийняття рішень, радіомоніторинг, системи супутникового зв'язку, автоматизоване управління, розподіл обмежених ресурсів, нечітка логіка, математичне програмування, інформаційна система, ступінь важливості каналу, апіорна невизначеність, прийняття рішень, багатокритеріальна оптимізація, функція належності, інформаційне забезпечення радіомоніторингу.

## ANNOTATION

Yehorov V.O. Information technologies of radio monitoring in satellite communication systems. – Qualification scientific work in the form of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 “Computer Science” – Institute of Telecommunications and Global Information Space National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

In today's rapidly developing communications and its impact on warfare, satellite communication systems have become of exceptional importance at the tactical, operational, and strategic levels. Satellite communications systems provide secure, interference-resistant, multi-channel information transmission and have become critically important components of military infrastructure and national security. In particular, the experience of modern military conflicts (including the war in Ukraine) demonstrates the growing role of the space segment in supporting combat operations.

At the same time, the problem of ensuring effective radio monitoring of satellite communication channels is acute. The effectiveness of this process is determined by the completeness of coverage of the necessary channels, the reliability of the data received, and the speed of response to changes in the situation. In practice, the capabilities of radio monitoring tools are limited: the number of simultaneously available posts and technical complexes, the time for reconfiguring receiving equipment, the frequency range, and energy resources - all this does not allow for the observation of the entire set of satellite communication channels. The problem is particularly complicated by the trend of increasing the number of operating satellites and channels, the complexity of signals, and the use of algorithms for masking and encryption, which increases the requirements for monitoring tools.

In addition, in real conditions, there is often a priori uncertainty - the lack of complete and accurate information about the parameters of satellite channels, their binding to specific spacecraft, transmitter operating modes, the degree of

informativeness of the transmitted data, etc. In such conditions, making a decision on the distribution of available radio monitoring resources is complicated: it must be made on the basis of limited, incomplete or unclear information. However, currently, at most radio monitoring posts, planning and resource allocation are performed manually, without sufficient use of modern information technologies and decision support algorithms. This leads to delays and subjectivity in response, which is unacceptable in fast-paced combat conditions, when decisions can sometimes be made in just a few minutes. Therefore, an urgent scientific and practical task is to develop automated methods for the rational distribution of available radio monitoring tools, capable of operating in real time and taking into account the uncertainty of the situation.

A promising direction for solving this problem is the creation of a specialized information system for automated planning and resource allocation of radio monitoring of the GNSS based on artificial intelligence and fuzzy logic methods. Fuzzy approaches allow us to formalize expert knowledge, operate with linguistic assessments, and make informed decisions with incomplete information. Combining fuzzy set theory with mathematical programming and data mining methods will allow achieving a balance between complete channel coverage, reliability of decisions made, and speed of response to changing circumstances. Therefore, the topic of the dissertation, dedicated to the automated distribution of radio monitoring means of satellite communication systems, is relevant from the point of view of both scientific significance and practical need.

The dissertation solves an important scientific problem - increasing the efficiency and validity of the process of distributing radio monitoring equipment for monitoring satellite communication system (SCS) channels under conditions of limited resources and a priori uncertainty. A comprehensive theoretical, methodological and algorithmic support is proposed, implemented in the form of an information system for automated resource allocation, which functions on the basis of fuzzy logic and mathematical programming.

The purpose of the work is to increase the efficiency and effectiveness of the process of distributing radio monitoring equipment for monitoring the communication channels of the ISS in conditions of uncertainty in the parameters of satellites and their operating modes. The achievement of the set goal is ensured by developing and implementing a new scientific and methodological apparatus and software tools to support decision-making for automated planning of radio monitoring. That is, the creation of a system and methodology for allocating resources that will allow for the fastest and most reasonable determination of which satellite channels should be monitored first, thereby ensuring more complete coverage of important channels with available technical means.

To achieve this goal, the dissertation solves a set of main tasks:

1. Analyze existing approaches to conducting radio monitoring of satellite communication systems (in particular in Ukraine), identify problematic aspects and requirements for improving this process.

2. Develop a mathematical model for the optimal distribution of radio monitoring equipment, which takes into account factors of a priori uncertainty and dynamism of the situation.

3. To form a system of indicators and a methodology for assessing the importance (priority) of satellite communication channels, taking into account their availability, informativeness, and technical characteristics, which would allow ranking channels by degree of importance for monitoring.

4. Develop the principles of operation and architecture of a decision support information system for automated planning and distribution of radio monitoring resources.

5. Implement a prototype of an information system for automated resource allocation, carry out its software verification (testing on model data) and evaluate the effectiveness of the proposed solutions in comparison with traditional approaches.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal, subject and object of the research, defines scientific tasks, methodological basis, elements of scientific novelty, practical significance and approbation of the results.

The first section highlights the current state and significance of satellite communications in civil and military systems. It provides an overview of the current state of satellite communications systems and their role in information networks.

In particular, the functions of satellites in providing communications, navigation, data transmission, radio monitoring, and other important areas are considered, which confirms their importance. Trends in the development of satellite systems are noted, in particular, increasing their bandwidth, reliability, and integration with other information systems. It is analyzed how these trends affect the tasks of radio monitoring: on the one hand, the volume of traffic and the number of channels to be monitored are increasing, on the other hand, the conditions for receiving signals are becoming more complicated due to the emergence of new technologies (spread spectrum, adaptive modulation methods, etc.).

The criteria and indicators for evaluating the effectiveness of radio monitoring are considered. It is established that existing distribution methods do not take into account the incompleteness of input data, are not adapted to uncertainty conditions, and the distribution itself is mostly carried out manually.

A scientific problem has been formulated: to create a methodological basis and a tool for automated, substantiated, and operational distribution of cardiovascular surveillance tools.

In the second section, based on the analysis of resource allocation problems, the feasibility of using mathematical programming methods in combination with fuzzy set theory is substantiated.

A theoretical justification of the choice of mathematical apparatus for optimizing the distribution of radio monitoring facilities is provided. Various approaches are considered: classical methods of optimal planning, stochastic models, as well as intellectual methods (expert systems, neural networks, fuzzy logic). It has been analyzed that traditional optimization models are difficult to apply

due to the high dynamism and uncertainty of the input data - for example, it is difficult to construct a deterministic objective function that would accurately reflect real-time efficiency criteria. Stochastic models also have limitations, as the probabilistic characteristics of signals and the operating modes of communication channels are unknown or change. Fuzzy logic was chosen as the basis of the methodological apparatus due to its ability to work with linguistic variables and uncertain concepts (such as "high channel information content" or "low signal quality"), as well as to easily integrate expert knowledge in the form of rules. It is noted that an effective approach is to combine fuzzy logic with elements of mathematical programming: fuzzy modules determine flexible coefficients and priorities, which are then used in the optimization procedure for resource allocation. Such a hybrid approach - fuzzy mathematical programming - allows you to obtain an allocation plan that is resistant to incomplete data and adaptive to changes.

Mathematical modeling of the process of optimal distribution of radio monitoring facilities has been carried out. The model is formulated as an optimization problem at each planning step and is presented as a dynamic optimization problem, where the optimality criterion flexibly changes depending on fuzzy estimates of the importance of channels and the state of resources. To solve this problem, an iterative algorithm is used: at each step, the importance of the channels is estimated, then the optimization subproblem of the distribution is solved, after which the system moves to the next interval with updated data. Recurrent relations are proposed for updating importance estimates, which ensures the adaptability of the model. A mathematical formulation of the distribution problem as an optimization problem is formulated, taking into account several criteria (informativeness, accessibility, importance of channels). Membership functions and Saati logic are used for the first time to construct a fuzzy benefit function.

The development of the structure of the information system for the distribution of radio monitoring means is described. The architecture of the software and hardware complex that implements automated planning is proposed.

The proposed model allows taking into account not only quantitative parameters, but also expert assessments presented in the form of linguistic scales, which is especially important in conditions of information uncertainty.

The third section proposes a new methodology for assessing the importance of satellite channels, which takes into account:

- signal energy losses in the atmosphere;
- structural availability of channels;
- information content indicators;
- integration into a single assessment through aggregation based on weighting factors.

The methods of rank and score evaluations, fuzzy channel classification, and the process of constructing weight coefficients were formalized. As a result, an importance function was constructed, which is used as a criterion in the optimal distribution problem.

In the fourth section, a software implementation of an information system for automated distribution of radio monitoring equipment is developed and the selection and justification of methods and criteria for assessing the effectiveness of the information system are made. The structure of a fuzzy logic controller is described: the main functions that perform fuzzy inference are given (fuzzification of input indicator values, application of rules from the knowledge base, defuzzification to obtain a numerical value of importance). The architecture, structure of the knowledge base, fuzzy inference blocks, learning and relearning mechanisms are described. The system implements adaptive real-time distribution control. Experimental verification of its effectiveness is carried out.

Experiments have shown that the use of IS allows:

- to reduce decision-making time by more than 3%;
- to increase the probability of correct allocation from 0.68 to 0.82;
- to increase inverse efficiency by 70%;
- to ensure stable coverage of satellite channels without increasing resources.

The scientific novelty lies in the fact that for the first time a mathematical model of the distribution of radio monitoring facilities has been proposed as an iterative process that takes into account uncertainty factors and multi-criteria, and a methodology for assessing the importance of channels taking into account multiple factors has been proposed.

For the first time, an information system for automated resource allocation with support for additional training, adaptation, and fuzzy logic has been implemented.

The results of the work are implemented in the form of an information system that can be integrated into radio monitoring posts. The system is suitable for operation in dynamic operational environments and can be used in other areas - control of unmanned platforms, distribution of sensor networks, etc.

The developed models, algorithms, and techniques can also be used in the educational process within disciplines related to optimization, systems analysis, and technical support for radio monitoring.

Keywords: information technology, decision support, radio monitoring, satellite communication systems, automated control, allocation of limited resources, fuzzy logic, mathematical programming, information system, degree of channel importance, a priori uncertainty, decision making, multi-criteria optimization, membership function, information support for radio monitoring.

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

### Статті у фахових виданнях України

1. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Математична модель розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів зв'язку із використанням нейронних мереж. Екологічна безпека та природокористування, 1(53) 2025 с.132-139 ISSN: 2411-4049.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.132-138>

2. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Оцінювання показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку Телекомунікаційні та інформаційні технології. № 1 (86) 2025. с.104-110 ISSN 2412-4338

<https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025/012360>

3. Єгоров В. Система автоматизованого програмного управління антенною системою супутникового радіомоніторингу. Екологічна безпека та природокористування//Збірник наукових праць: вип. 4(52), 99–105. 2024. ISSN-2616-2121 ISSN-2411-4049

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.99-105>

### Стаття Scopus

4. Vasyl Trysnyuk, Volodymyr Yehorov, Serhii Tymchuk, Taras Trysnyuk. Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. ITTAP 2022. Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2022. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022). P. 117-123. Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2022.

<https://ceur-ws.org/Vol-3309/> <https://ceur-ws.org/Vol-3309/short5.pdf>

### Конференція Scopus.

5. Improvement Of The System Of Automated Pointing Of The Antenna To The Satellite. V.Ehorov, T. Trysnyuk, V. Prystupa, Ye. Nahornyj, V. Marushchak European Association of Geoscientists&Engineers 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2022, Volume 2022, p.1 – 5. DOI:

<https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580098>

### **Участь у конференціях.**

6. Ставісюк Р.Л., Єгоров В.О., Радущинський О.П. Застосування електронно-оптичних конвекторів для підвищення ефективності та діяльності віддаленого радіомоніторингу в ультракороткохвильовому діапазоні частот. – Міжнародна наукова конференція. 30 травня 2025 р. м. Житомир

7. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Технології передачі даних: швидкість та стабільність роботи мережі систем зв'язку. Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 12-13 листопада 2024 р., с.65–67. ISBN 978-617-8335-33-5

8. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Методи та алгоритми перехоплення супутникових систем зв'язку. 22 Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення». Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України м. Київ 14-15 листопада 2023 р. с. 109-110.

[https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1\\_zbirka\\_08\\_11\\_23-1-1.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf)

9. Андрущенко І.С., Єгоров В.О., Бриндак В.П. Інформаційні технології в підготовці військових фахівців. - Тези XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології» Житомир, 30–31 березня 2023 р.150-152

<https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/150.pdf>

10. Андрущенко І.С., Єгоров В.О., Бриндак В.П. Моделювання радіоелектронної обстановки в зоні дії засобу радіозв'язку.

<https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/251.pdf>

11. Ставісюк Р.Л., Єгоров В.О., Гайка Ю.А., Гончаров Д.О. Проблемні питання побудови захищених комп'ютерних мереж для забезпечення захисту інформації в спеціальних мережах підрозділів Збройних Сил України.

<https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/96.pdf>

12. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Пристрій автоматизованого програмного управління антеною системи супутникового радіомоніторингу. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 181-183.

[https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06\\_UDK\\_book\\_Monografia\\_48x210.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf)

13. Єгоров В.О., Андрущенко І.С., Гайка Ю.А. Оптимальне розміщення засобів радіомоніторингу та радіопеленгування при їх роботі в комплексі. – V Всеукраїнська науково-технічна конференція. 01 - 02 грудня 2022 р. м. Житомир

14. Сметанін К.В., Єгоров В.О. Основні тенденції розвитку надзвичайних ситуацій терористичного характеру на потенційно небезпечних об'єктах. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року. Колективна монографія за матеріалами XX Міжнародної науково-практичної конференції. (Київ, 04-08 жовтня 2021 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2021. – с. 153-154. ISBN 978-617-7854-58-5.

[https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1\\_zbirka\\_2021.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_zbirka_2021.pdf)

15. Особливості розгортання та застосування технічних засобів РЕР у ході ведення розвідки у міській місцевості. Рекомендації для ведення бойових дій (на основі бойового досвіду). Випуск 3. Житомир: ЖВІ, 2023

16. О. В. Левченко, М. А. Роговець, В. О. Єгоров та ще 12 осіб. Досвід ведення радіоелектронної розвідки в місті: навчально-методичні матеріали. Житомир : ЖВІ, 2022. 52 с

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	22
ВСТУП .....	23
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВЕДЕННЯ РАДІОМОНІТОРИНГУ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	30
1.1. Значення та функції систем супутникового зв'язку у здійсненні радіомоніторингу.....	30
1.1.1. Дослідження застосування супутникових систем зв'язку .....	32
1.1.2. Аналіз використання засобів радіомоніторингу супутникових систем зв'язку.....	44
1.2. Критерії та показники оцінювання ефективності ведення радіомоніторингу каналів ССЗ .....	57
1.3. Аналіз наявних підходів до розподілу технічних засобів радіомоніторингу для здійснення спостереження за джерелами інформації.....	63
1.4. Визначення оптимального плану розподілу засобів радіомоніторингу супутникових систем зв'язку: формулювання задачі дослідження.....	73
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	83
РОЗДІЛ 2 ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ НА СПОСТЕРЕЖЕННЯ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	85
2.1. Теоретичне обґрунтування вибору математичного апарату для оптимізації процесу розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження систем супутникового зв'язку .....	85
2.2. Математичне моделювання процесу оптимального розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку.....	89
2.3. Розробка інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу супутникового зв'язку на основі нечіткого програмування.....	97
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	108

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВАЖЛИВОСТІ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ.....	110
3.1. Методичне обґрунтування системи показників для визначення важливості каналів передачі даних у супутникових системах.....	110
3.2. Розробка методики оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку .....	119
3.2.1. Побудова дерева нечіткого логічного висновку та формування бази знань для оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку.....	120
3.2.2. Побудова функцій належності нечітким термам показників оцінювання важливості супутникових каналів передачі даних .....	128
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	146
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА СИСТЕМАМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	147
4.1. Практична реалізація методики оцінювання пріоритетності каналів систем супутникового зв'язку .....	147
4.2. Вибір та обґрунтування методів і критеріїв оцінювання функціональних характеристик інформаційної системи .....	150
4.3. Оцінювання ефективності використання інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження за системами супутникового зв'язку.....	154
4.4. Архітектура та програмна реалізація інформаційної системи автоматизованого планування та розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження за системами супутникового зв'язку.....	162
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	167
ВИСНОВКИ.....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	171
ДОДАТКИ.....	178
ДОДАТОК А Таблиця ваг для значень лінгвістичних змінних .....	179

ДОДАТОК Б Матриця знань оцінювання важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку .....	180
ДОДАТОК В Акт реалізації .....	187

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АРМ	– автоматизоване робоче місце
АС	– антенна система
АСУ	– автоматизована система управління
ГСО	– геостаціонарна орбіта
ЕМД	– електромагнітна доступність
ЕОМ	– електронно-обчислювальна машина
ІМ	– інформаційна модель
КА	– космічний апарат
НВЧ	– надвисокі частоти
РЕЗ	– радіоелектронний засіб
РТЗ	– радіотехнічне забезпечення
СПЗ	– спеціалізоване програмне забезпечення
СППР	– система підтримки прийняття рішення
ССЗ	– системи супутникового зв'язку
ТТХ	– тактико-технічні характеристики
УВЧ	– ультрависокі частоти
AFSATCOM	– Air Force SATellite COMmunications system
ATM	– Asynchronous Transfer Mode
DSCS	– Defense Satellite Communications System
FTP	– File Transfer Protocol
HTTP	– Hyper Text Transfer Protocol
NAVSTAR	– NAVigation Satellites providing Time And Range
TCP/IP	– Transmission Control Protocol / Internet Protocol
UFO	– Ultra High Frequency Follow On

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасних умовах стрімкого розвитку засобів зв'язку, управління та ведення бойових дій системи супутникового зв'язку (ССЗ) набули винятково важливого значення у структурах тактичного, оперативного, стратегічного та державного рівнів. Вони забезпечують захищене, завадостійке, багатоканальне передавання інформації: мовних повідомлень, телеметрії, зображень високої роздільності та відеопотоків. Широке використання ССЗ в сучасних арміях, зокрема в російських ЗС, підтверджується змістом стратегічних і доктринальних документів, аналізом публічних технічних програм розвитку військової інфраструктури, а також подіями війни в Україні, де спостерігається зростання ролі космічного компоненту в інформаційному забезпеченні бойових операцій.

Водночас актуальною проблемою залишається забезпечення ефективного радіомоніторингу супутникових каналів, який має відповідати таким вимогам як повнота охоплення, достовірність даних та, головне, оперативність прийняття рішень в умовах високої динамічності обстановки. На практиці засоби радіомоніторингу мають обмежений ресурс (часовий, енергетичний, технічний), що унеможливорює одночасне спостереження за всією сукупністю супутникових каналів, зокрема в умовах збільшення кількості супутників, складності сигналів та зростання кількості алгоритмів їх маскуванню або шифрування.

Особливої гостроти проблема набуває в умовах апріорної невизначеності - коли відсутні точні дані щодо відповідності каналів супутникам, їх актуального режиму роботи, інформативності тощо. У таких умовах рішення про розподіл засобів радіомоніторингу має прийматися на основі обмеженої, неповної або нечіткої інформації. Ускладнює ситуацію й той факт, що на більшості постів радіомоніторингу розподіл засобів досі здійснюється вручну, без достатнього використання інтелектуальних інформаційних технологій.

У сучасних бойових умовах, коли темп зміни обстановки високий, а час на реагування може становити лічені хвилини, необхідне впровадження автоматизованих рішень для раціонального розподілу наявних засобів. Одним із перспективних напрямів вирішення цього завдання є використання інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу, побудованої на засадах нечіткої логіки, штучного інтелекту та моделей математичного програмування.

У цьому контексті особливого значення набуває розробка науково-методичного апарату, що дозволяє:

- формалізувати задачу розподілу в умовах невизначеності;
- інтегрувати знання експертів з об'єктивною інформацією;
- забезпечити оперативне прийняття рішень, адаптованих до поточної обстановки;
- гарантувати достовірність та повноту охоплення каналів супутникового зв'язку.

Ряд українських (Зайченко Ю. П., Даник Ю. Г., Шматок С. О., Сєрая О. В.) та зарубіжних дослідників (Таһа Н. А., Bellman R. E., Zadeh L. A.) зробили значний внесок у розвиток моделей оптимального розподілу обмежених ресурсів, зокрема у складних технічних і військових системах. Однак питання оперативного автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ із урахуванням актуальних викликів, притаманних сучасним бойовим умовам, досі не отримало повного вирішення.

З огляду на вищенаведене, актуальним науковим завданням є удосконалення процесу розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на основі поєднання сучасних методів оптимізації, нечіткої логіки, експертного оцінювання та інтелектуального аналізу даних, з метою досягнення балансу між повнотою охоплення, достовірністю рішень і часом реагування.

**Мета і задачі досліджень.** Мета роботи полягає у підвищенні оперативності розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження за каналами зв'язку ССЗ в умовах апріорної невизначеності параметрів

спутників і режимів їх роботи, шляхом розробки та впровадження математичного та програмного інструментарію автоматизованої підтримки рішень.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні науково-прикладні завдання:

1. Провести аналіз існуючих підходів і стану процесу ведення радіомоніторингу ССЗ в Україні;
2. Розробити математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу з урахуванням апріорної невизначеності;
3. Сформулювати методику оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку з урахуванням їх доступності, інформативності та технічних характеристик;
4. Розробити принципи функціонування та структуру інформаційної системи підтримки рішень;
5. Реалізувати інформаційну систему автоматизованого розподілу засобів, провести її програмну верифікацію та оцінювання ефективності.

**Об'єкт дослідження.** Процес добування інформації в системах радіомоніторингу супутникових каналів зв'язку.

**Предмет дослідження.** Науково-методичне забезпечення розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на спостереження в умовах обмеженого ресурсу та невизначеності.

**Методи дослідження.** У роботі використано: методи аналізу, синтезу, математичного програмування, найменших квадратів, математичного моделювання, експерименту, рангових оцінок, теорії корисності, теорії нечітких множин.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові результати дисертації отримані в межах програми науково-дослідних робіт на базі Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України та реалізовані у тематиках: «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості

об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоекосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216), «Розробка обчислювальних технологій та методів моделювання для дослідження нестаціонарних процесів» (№ РК 0116U000793 державної реєстрації), Закон України «Про національну безпеку України», Стратегія національної безпеки України «Безпека людини – безпека країни» та Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розроблено математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів зв'язку, яка відрізняється від відомих описом задачі у вигляді ітераційного процесу управління із застосуванням рекурентних співвідношень. Модель побудована на основі функцій належності та математичного апарату теорії нечітких множин, що дозволяє формалізувати процес розподілу в умовах невизначеності стану та режимів функціонування супутників зв'язку.

2. Розроблена та впроваджена методика оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку, яка має новизну в тому, що враховує:

- втрати енергії сигналу в неоднорідному середовищі (атмосфері);
- структурну доступність каналів;
- поєднання показників інформативності та доступності в єдину інтегральну оцінку;
- побудову аналітичної моделі, що підвищує достовірність і оперативність оцінювання важливості каналів в умовах неповноти даних.

3. Удосконалено методику розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, яка має новизну у використанні ступеня важливості каналів, заданого у вигляді нечіткої множини, як критерію прийняття рішення. Це забезпечує адаптацію до змін обстановки та підвищує ефективність і оперативність розподілу ресурсів у ситуаціях із невизначеними або змінними параметрами супутникових каналів.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Вперше запропоновано використання інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів зв'язку, яка забезпечує формування раціонального плану застосування наявних ресурсів з урахуванням невизначеності інформаційної обстановки та обмеженості технічних засобів.

2. Запропонована методика оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку, заснована на інтеграції показників доступності, інформативності та енергетичних характеристик, дозволяє формувати обґрунтовані рекомендації щодо їх ранжування в умовах неповної та нечіткої вхідної інформації, що підвищує достовірність прийняття рішень у складних радіоелектронних умовах.

3. На основі проведених досліджень створено та реалізовано інформаційну систему автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, яка успішно пройшла апробацію в рамках моделювання сценаріїв радіомоніторингу супутникових каналів. Її впровадження забезпечує підвищення оперативності планування на понад 3 %, при цьому досягається максимальна повнота охоплення каналів зв'язку без збільшення кількості використовуваних ресурсів.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, особистий внесок автора полягає у:

- розробці методики автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на спостереження супутникових каналів зв'язку;
- побудові математичної моделі розподілу засобів радіомоніторингу, що враховує невизначеність стану та режимів функціонування супутникових каналів;
- обґрунтуванні системи показників оцінювання важливості каналів та формалізації відповідної методики з урахуванням критеріїв інформативності, доступності та структурних характеристик;

- постановці та формалізації задачі розподілу засобів у вигляді ітераційного процесу прийняття рішення за умов динамічної зміни обстановки;
- визначенні архітектури та функціональних компонентів інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, а також її алгоритмічному забезпеченні.

Отримані результати є особистим науковим здобутком дисертанта та мають завершений теоретико-прикладний характер, що дозволяє їх практичне впровадження у сфері інформаційного забезпечення радіомоніторингу.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації оприлюднені: на European Association of Geoscientists&Engineers 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 2022; на XXIII Міжнародній науково-практичній конференції «Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення» у 2024 році; на XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення» на базі інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України у 2023 році; на XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційно-комп'ютерні технології» у 2023 році; на V Всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» у 2022 році; на XXI Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» у 2022 році; на XX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року», практичні результати впроваджені в військовій частині А2667 та у освітньому процесі Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова (додаток В).

**Публікації.** Результати дисертаційних досліджень опубліковані в 15 наукових працях: 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття

Scopus та 11 статей в міжнародних та відтизняних науково-практичних конференціях.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 188 сторінок, з них 170 – основного тексту; 26 – ілюстрацій, 26 – таблиць; список 73 використаних джерел.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВЕДЕННЯ РАДІОМОНІТОРИНГУ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1. Значення та функції систем супутникового зв'язку у здійсненні радіомоніторингу.

Сучасний світ зазнає швидких змін у зовнішньополітичній та воєнно-політичній сфері, що суттєво впливає на еволюцію міжнародної системи безпеки та адаптацію національних стратегій [30, 44, 48, 58, 62].

Оцінка програм і стратегічних планів оновлення збройних сил провідних країн світу дозволяє відокремити основні тенденції розвитку систем управління та озброєння:

інтеграція передових обчислювальних та комунікаційних технологій у бойові системи для створення єдиної цифрової картини поля бою, що дозволяє підрозділам діяти в реальному часі в умовах динамічних змін;

уніфікація та об'єднання систем управління озброєнням в єдину інформаційно-керуючу платформу, що забезпечує ефективну координацію між всіма видами військ та родами збройних сил;

розвиток децентралізованих мереж зв'язку та обчислювальних систем , зокрема із застосуванням штучного інтелекту та машинного навчання, що забезпечує стійкість і автономність військових операцій, особливо в умовах ведення бойових дій у зонах активного радіоелектронного придушення;

збільшення швидкодії та адаптивності спеціалізованого математичного і програмного забезпечення інформаційних систем управління на високодинамічну обстановку;

акцент на космічні технології та супутниковий зв'язок у зв'язку з їхньою критичною роллю в сучасних конфліктах. Провідні армії світу розгортають нові супутникові угруповання для забезпечення зв'язку, навігації, розвідки та раннього попередження про ракетні атаки;

збільшення швидкості та адаптивності програмного забезпечення для військових систем управління, що дозволяє оперативно аналізувати величезні масиви даних і приймати рішення в режимі реального часу, зокрема з використанням алгоритмів штучного інтелекту;

впровадження розумних систем підтримки прийняття рішень у командні структури, що дає можливість більш ефективного розподілу ресурсів, координації вогневих ударів та управління тактичними підрозділами у багатодоменному середовищі;

розширення ролі супутникових систем зв'язку у військовій інфраструктурі для забезпечення безперебійного функціонування критично важливих компонентів армії, а також інтеграція комерційних технологій у державні оборонні програми;

збільшення пропускну здатності та надійності супутникового зв'язку, що забезпечує можливість масштабного обміну інформацією між бойовими підрозділами, командуванням та розвідувальними структурами;

використання комерційних космічних та цифрових технологій (наприклад, супутникового зв'язку Starlink, активних навігаційних сервісів GPS, Galileo, а також хмарних обчислень і Big Data) для покращення комунікаційних і розвідувальних можливостей військових сил.

Таким чином, модернізації збройних сил стали особливо актуальними в умовах сучасних військових конфліктів, що демонструють важливість технологічних переваг, гнучкості управління, інформаційної інтеграції та стійкості до ворожих кібератак і засобів радіоелектронної боротьби, що безпосередньо впливає на збільшення інтенсивності застосування ССЗ тому їх радіомоніторинг є одним з важливих напрямків контролю застосування, добування інформації тощо [31, 39].

Розглянемо ключові принципи застосування супутникових систем зв'язку провідними країнами світу.

### 1.1.1. Дослідження застосування супутникових систем зв'язку

На озброєнні збройних сил провідних країн світу знаходяться стаціонарні та мобільні станції супутникового зв'язку, які працюють через штучні супутники Землі — ретранслятори військових систем супутникового зв'язку (ССЗ) у діапазонах ультрависоких частот (УВЧ) — 225-400 МГц та надвисоких частот (НВЧ) — 8/7 ГГц, 44/20 ГГц, 30/20 ГГц. Ці системи забезпечують надійний та захищений зв'язок для військових підрозділів у різних умовах. На даний час основними ССЗ військового призначення є [12]: “WGS”, “АЕНФ”, “MUOS”, “MILSTAR” у ЗС США, “SKYNET” у ЗС Великої Британії, “SYRACUSE” у ЗС Франції, “SICRAL” у ЗС Італії, “SATCOM” у ОЗС блоку НАТО, “SPAINSAT NG” у ЗС Іспанії, “МЕРИДІАН”, “БЛАГОВЕСТ” у ЗС Росії, “ТЯНЬЛІНЬ” у ЗС Китаю, “GSAT” у ЗС Індії.

В операціях “Непохитна свобода” в Афганістані (2001 – 2014) використовувались системи: MILSTAR, DSCS, UFO (UHF Follow-On), які забезпечували організацію стратегічного та тактичного зв'язку між командуванням та військами в умовах складного рельєфу, підтримку передачі даних для безпілотних літальних апаратів та координація авіаударів.

В операції “Свобода Іраку” (2003 – 2011) використовувались системи: WGS (Wideband Global SATCOM), MILSTAR, які забезпечували використання високошвидкісного зв'язку для передачі відео в реальному часі, координацію дій між коаліційними силами та підтримку мережевих бойових систем.

У російсько - українській війні (2014 – теперішній час) широко використовуються комерційні супутникові системи, такі як STARLINK та супутники дистанційного зондування ICEYE, які забезпечують стабільний інтернет-зв'язок для військових підрозділів, передачу розвідувальних даних, коригування артилерійського вогню та координація дій безпілотних літальних апаратів.

За даними на 2020 рік, на орбіті перебувало майже дві тисячі активних супутників, причому геостаціонарна орбіта є обмеженим ресурсом із дуже обмеженою кількістю вакантних місць.

Станом на 2023 рік, на геостаціонарній орбіті перебувало 590 супутників. Ця орбіта широко використовується для розміщення комунікаційних, телетрансляційних та інших супутників.

Супутникові системи зв'язку відігравали ключову роль у військових операціях США на Близькому Сході, особливо під час кампаній в Іраку, Сирії та Афганістані. Вони забезпечували координацію військових дій, передачу розвідувальної інформації, управління військами та підтримку союзників.

Вони дозволяли командуванню швидко передавати накази та обмінюватися інформацією між штабами та польовими підрозділами, що було критично важливим у складних умовах регіону. ССЗ забезпечували захищений зв'язок для координації авіаударів і використання безпілотників, передаючи відеопотоки та дані розвідки в режимі реального часу. Розвідувальні супутники допомагали відстежувати пересування терористичних угруповань та ідентифікувати стратегічні цілі, а навігаційні системи GPS сприяли точному орієнтуванню військових підрозділів у пустельних та міських умовах. Важливим напрямком застосування була також логістика та безперервне постачання військ, що координувалося через супутниковий зв'язок. Крім того, ССЗ використовувалися для інформаційних і кібероперацій, зокрема для радіотрансляцій та придушення ворожих комунікаційних систем. У сукупності ці технології значно підвищили ефективність військових операцій США в регіоні, забезпечуючи швидкий і надійний обмін інформацією на всіх рівнях. [15].

Системи супутникового зв'язку відіграли критично важливу роль у військових конфліктах останніх десятиліть, забезпечуючи зв'язок між підрозділами, координацію бойових дій, розвідку та наведення високоточної зброї. Під час війни в Перській затоці (1990–1991) коаліційні сили під проводом США активно використовували супутникові комунікаційні системи,

такі як DSCS (Defense Satellite Communications System) і Fleet Satellite Communications (FLTSATCOM), для забезпечення оперативного управління військами, авіацією та логістикою. Високоточні авіаудари, які стали однією з визначальних характеристик операції “Буря в пустелі”, значною мірою залежали від супутникового зв’язку та навігації, що надавала система GPS.

У війні в Іраку (2003–2011) роль ССЗ ще більше зросла, оскільки військові операції все більше поклалися на швидкий обмін даними, координацію ударів безпілотних літальних апаратів і забезпечення мобільного зв’язку для командування. Використання супутникових систем, таких як MILSTAR (Military Strategic and Tactical Relay) та SATCOM (Satellite Communications), дозволяло здійснювати безпечний зв’язок між військовими штабами та підрозділами на передовій. Крім того, застосування мережевих бойових систем, наприклад, Blue Force Tracking (BFT), яка базується на супутниковому зв’язку, допомагало американським військовим уникати “дружнього вогню” та забезпечувати ефективне управління бойовими діями.

У конфлікті в Сирії (з 2011 року) супутникові системи використовуються не лише державними військовими силами, а й недержавними, включаючи повстанські угруповання та приватні військові компанії. США та їх союзники застосовували супутниковий зв’язок для управління розвідувальними і ударними БпЛА, що здійснювали атаки на бойовиків терористичних угруповань. Крім того, російські війська використовували власні супутникові системи зв’язку, такі як “Гонец” і “Благовест”, для координації військових операцій і управління авіацією.

Окрім традиційного військового застосування, ССЗ у сучасних конфліктах виконує й гуманітарні функції – забезпечує зв’язок для міжнародних організацій, що працюють у зонах бойових дій, допомагає журналістам та спостерігачам передавати інформацію, а також дозволяє цивільним особам підтримувати зв’язок у регіонах зруйнованої інфраструктури. Також, сучасні комерційні супутникові системи, такі як Starlink, продемонстрували свою ефективність у військових умовах,

забезпечуючи резервний зв'язок у ситуаціях, коли традиційні мережі були знищені або заблоковані.

Широке застосування систем супутникового зв'язку зумовлене їх унікальними характеристиками, які забезпечують ефективний та надійний зв'язок у глобальному масштабі. До основних властивостей таких систем належать:

широка зона покриття, що дозволяє охоплювати всю поверхню Землі, включаючи віддалені та важкодоступні регіони;

зручність у реалізації ширококомовної та багатоадресної передачі, що спрощує одночасну доставку інформації великій кількості користувачів;

гнучкість у підтримці різноманітних інформаційних послуг, включаючи передачу голосу, відео, даних та мультимедійних потоків;

незалежність методів передачі та комутації від технології надання послуг, що забезпечує сумісність з різними мережевими інфраструктурами;

можливість одночасної передачі різнорідних інформаційних потоків (мовлення, аудіо, відео, факс, дані тощо), незважаючи на їх відмінності у вимогах до якості зв'язку;

підтримка як безперервного, так і пакетного трафіку, що дозволяє ефективно використовувати ресурси мережі;

здатність одночасно обслуговувати інтерактивні служби, як із встановленням з'єднання, так і без нього;

можливість надання зв'язку рухомим користувачам, що є критично важливим для авіації, морського транспорту та мобільних військових підрозділів;

висока пропускна здатність каналів зв'язку при збереженні високої якості передачі, що забезпечує стабільність роботи навіть при великих навантаженнях;

гнучкість у побудові мережевої архітектури, включаючи створення топологій із високою надійністю та повнозв'язністю;

швидке розгортання та налаштування обладнання, що дозволяє оперативно вводити систему в експлуатацію при надзвичайних ситуаціях або військових операціях.

З іншого боку, сучасні тенденції розвитку вимагають від ССЗ не лише високої продуктивності, а й відповідності новітнім технологічним і безпековим стандартам, а саме:

кібербезпеки та захисту інформації, що вимагає використання квантової криптографії, штучного інтелекту для виявлення загроз та новітніх методів шифрування для запобігання кібератакам;

низькою затримкою зв'язку за рахунок оптимізації технологій для зниження затримок у передачі даних, що критично для безпілотних систем, військових операцій і автономного транспорту;

стійкості до радіоелектронної боротьби зумовлює використання адаптивних антен, вузькоспрямованих каналів зв'язку та технологій змінної модуляції для протидії перешкодам;

енергоефективність та автономність повинна забезпечуватись за рахунок зменшення енергоспоживання наземних станцій та створення супутників з автономними джерелами енергії;

інтеграція з технологіями 5G та AI імплементує як елемент взаємодії з наземними мережами 5G, хмарними обчисленнями та штучним інтелектом для підвищення ефективності та автоматизації зв'язку.

Таблиця 1.1 - Кількість запусків космічних апаратів за країнами (2005–2024 роки)

Рік	США	Росія	Китай	Європейські країни (ESA)	Інші країни
2005	18	26	6	5	3
2010	15	31	15	6	5
2015	20	29	19	7	8
2020	40	17	39	5	10
2024	55	22	55	7	12

Крім того особливостями функціонування ССЗ є [16, 22, 34]:

повна конфіденційність переданої інформації, що унеможливорює відкритий доступ або перехоплення даних;

відсутність жорсткого закріплення супутникових каналів за конкретними користувачами, що забезпечує динамічний розподіл ресурсів;

застосування інноваційних методів модуляції сигналів, включаючи адаптивну фазову модуляцію та спектральне розширення сигналу;

використання технології DAMA для гнучкого розподілу каналів на вимогу користувачів;

автоматичне резервування каналів зв'язку, що забезпечує безперебійну роботу навіть при пошкодженні окремих супутників або станцій;

захист від засобів радіоелектронної боротьби шляхом використання вузькосмугових каналів, стрибкоподібної зміни частот (FHSS) та адаптивного кодування;

висока адаптивність до змінних умов навколишнього середовища, що дозволяє зберігати стабільність сигналу навіть під час сонячної активності чи космічних бурь;

Основні особливості, що характеризують динаміку організації та застосування ССЗ в повсякденній діяльності та під час спеціальних операцій [16, 34, 70]:

висока мобільність, гнучкість у розподілі ресурсів, стійкість до зовнішніх впливів та здатність забезпечувати зв'язок у віддалених і кризових регіонах. У повсякденному використанні ССЗ відіграють ключову роль у забезпеченні глобальної комунікації для урядових установ, військових, рятувальних служб, комерційних структур та транспортних компаній, що особливо важливо для морських, повітряних і віддалених наземних операцій, де відсутня розвинена інфраструктура традиційних мереж зв'язку. Вони забезпечують безперебійний зв'язок незалежно від погодних умов, рельєфу місцевості чи можливих пошкоджень наземної інфраструктури;

забезпечення безпечного та конфіденційного зв'язку між командними пунктами та оперативними групами на полі бою. Використання передових

технологій шифрування та протоколів захисту, таких як спектральне розширення сигналу, стрибкоподібна зміна частот (FHSS) і адаптивне кодування, мінімізує ризики перехоплення або радіоелектронного придушення супротивником. Завдяки динамічному розподілу ресурсів та технології DAMA (Demand Assigned Multiple Access), можливо оперативно виділяти канали зв'язку для критично важливих завдань, що підвищує ефективність управління військовими діями або кризовими ситуаціями;

автоматичне резервування каналів зв'язку є ще однією важливою характеристикою ССЗ, що забезпечує стійкість системи навіть у випадку виходу з ладу окремих супутників чи наземних станцій. Це досягається за рахунок розподілу навантаження між альтернативними каналами зв'язку, використання резервних ретрансляторів та адаптивних методів маршрутизації трафіку. У військовій сфері та під час спеціальних операцій це дозволяє зберігати контроль над бойовою ситуацією навіть при активному впливі засобів радіоелектронної боротьби з боку противника;

взаємодія з іншими високотехнологічними засобами, такими як безпілотні літальні апарати (БпЛА), системи радіолокації, розвідувальні комплекси та автономні навігаційні системи. Вони забезпечують ефективну передачу розвідувальних даних у режимі реального часу, що критично важливо для виявлення, ідентифікації та нейтралізації загроз у найкоротші терміни. Окрім військового застосування, ССЗ використовуються для підтримки зв'язку в гуманітарних місіях, пошуково-рятувальних операціях, а також для моніторингу екологічних катастроф і ліквідації наслідків природних катаклізмів.

При радіоперехопленні сигналів ССЗ першочерговий інтерес становлять такі сигнальні характеристики, як центральна частота та ширина спектру частотних каналів, їх загальна кількість, границі частотного діапазону, в якому працює передавальна апаратура КА.

Для потреб ССЗ виділено окремі ділянки частотного діапазону НВЧ, регламентовані стандартом ITU-R V.431-7 (Nomenclature of the frequency and

wavelength bands used in telecommunications). Позначення основних частотних діапазонів, числові значення їх границь та застосування показано у табл. 1.2 [7, 16, 32, 40, 70].

Таблиця 1.2 - Позначення та застосування частотних діапазонів для потреб супутникових систем зв'язку згідно з ІТУ-R V.431-7

Буквене позначення	Межі частотних діапазонів, ГГц		Застосування
	КА – Земля	Земля – КА	
P	0,225-1,0	0,225-1,0	Рухомий супутниковий зв'язок. Низькошвидкісна передача даних.
L	1,610-1,660	1,525-1,559	Рухомий супутниковий зв'язок. Низькошвидкісна передача даних.
S	1,970-2,690	2,160-2,529	Рухомий супутниковий зв'язок. Низькошвидкісна передача даних.
C	3,5-4,2	5,925-6,425	Фіксований супутниковий зв'язок. Передача даних. Супутникове мовлення.
X	5,2-10,9	5,2-10,9	Фіксований супутниковий зв'язок (для військових цілей)
Ku	10,7-12,75	12,75-18,0	Фіксований супутниковий зв'язок. Передача даних, Інтернет. Цифрове супутникове мовлення
K	18-20	17,7-20,2	Фіксований супутниковий зв'язок. Передача даних, Інтернет. Супутникове мовлення.
Ka	20-40	27,5-30,0	Фіксований супутниковий зв'язок. Широкополосний супутниковий зв'язок. Передача даних, Інтернет. Цифрове супутникове мовлення
Q	35-50	37,5-50,2	Фіксований супутниковий зв'язок. Широкополосний супутниковий зв'язок. Передача даних, Інтернет. Цифрове супутникове мовлення
V	50-75	50-75	Фіксований супутниковий зв'язок. Широкополосний супутниковий зв'язок. Передача даних, Інтернет. Цифрове супутникове мовлення
W	75	110	Фіксований супутниковий зв'язок. Широкополосний супутниковий зв'язок. Передача даних, Інтернет. Цифрове супутникове мовлення

Розподіл виділеного частотного спектра для потреб супутникового зв'язку є нерівномірним. Аналіз архітектури засобів супутникового зв'язку та принципів їхнього використання [5, 14, 19, 20, 21] показує, що найбільша

концентрація каналів ССЗ припадає на діапазони С, Х та Ku, які охоплюють загальний частотний інтервал у межах 3,5–12,75 ГГц. Враховуючи це, саме цей діапазон є найбільш доцільним для реалізації радіоперехоплення сигналів.

Сучасна апаратура супутникового зв'язку функціонує виключно в цифровому форматі, що зумовлює використання різних типів модуляції, зокрема багатократної фазової, офсетної та комбінованих методів. Основу передачі даних становлять цифрові протоколи АТМ, ТСП/ІР, НТТР, FТР, а також алгоритми перешкодостійкого кодування та захисту інформації [4, 16, 25, 36, 49, 70]. Враховуючи ці технологічні особливості, основним методом радіомоніторингу є технічний аналіз радіосигналів супутникових каналів.

Аналіз останніх досліджень у сфері супутникового зв'язку свідчить про значне зростання інтересу провідних держав до розширення його застосування, зокрема для організації зв'язку, передачі даних та забезпечення доступу до Інтернет-ресурсів [17, 33].

Останнім часом у збройних силах країн Західної Європи спостерігається активна модернізація супутникових систем зв'язку. Європейська комісія розглядає можливість створення нової мережі військових супутників для зменшення залежності від США та покращення геопросторової розвідки, що дозволить виявляти загрози та координувати військові дії. Крім того, планується запуск програми GOVSATCOM та придбання мережі IRIS, яка забезпечить широкосмуговий зв'язок на низькій навколосемній орбіті. У довгостроковій перспективі обговорюється можливість інтеграції національних супутникових систем у єдину європейську мережу оперативно-тактичного призначення, що підвищить ефективність військових комунікацій. Також розглядається активніше використання комерційних супутникових платформ для розширення можливостей як військових, так і цивільних комунікацій.

Таким чином, у провідних країнах світу триває активний розвиток та модернізація систем супутникового зв'язку, що відіграють ключову роль у забезпеченні інформаційної переваги під час бойових дій. Одним із головних

векторів цього розвитку є інтеграція супутникових платформ у концепцію мережево-центричних бойових дій, яка передбачає глибоку взаємодію між різними видами військ, використання єдиної інформаційної інфраструктури та забезпечення оперативного обміну розвідувальними та тактичними даними у режимі реального часу.

Завдяки застосуванню сучасних супутникових технологій, таких як високошвидкісний широкосмуговий зв'язок у Ka- та Q/V-діапазонах, адаптивна фазова модуляція, стрибкоподібна зміна частот (FHSS), а також передові алгоритми шифрування, досягається підвищена стійкість зв'язку до перешкод та засобів радіоелектронної боротьби противника. Супутниковий зв'язок забезпечує ефективне управління військами, контроль над безпілотними літальними апаратами, високоточне наведення ударних систем, а також надійну комунікацію у важкодоступних регіонах та зонах активних бойових дій.

Крім того, провідні країни інвестують у створення нових орбітальних угруповань супутників подвійного призначення (військового та цивільного використання), що дозволяє використовувати як спеціалізовані військові мережі, наприклад, американські WIDEBAND GLOBAL SATCOM (WGS) або європейські GOVSATCOM та IRIS, так і комерційні STARLINK, ONEWEB, SES O3B, для потреб військових операцій.

На стратегічному рівні триває розробка єдиної європейської супутникової системи зв'язку оперативно-тактичного рівня, яка у перспективі об'єднає національні системи країн-членів ЄС та НАТО в єдину мережу. Такий підхід дозволить зменшити залежність від США, покращити оперативну сумісність союзних військ та забезпечити стабільність комунікацій навіть у разі знищення або виведення з ладу окремих наземних станцій та супутників.

У найближчі роки особливий акцент робиться на використанні штучного інтелекту та квантових комунікацій у супутникових мережах, що дозволить не тільки автоматизувати управління каналами зв'язку, а й

забезпечити захист від кібератак та перехоплення сигналів, що є критично важливим у сучасних умовах ведення бойових дій [16, 25].

На сьогоднішній день системи супутникового зв'язку відіграють ключову роль у створенні глобальних інформаційно-телекомунікаційних мереж (ITM), що забезпечують високошвидкісну передачу даних у режимі реального часу. Завдяки використанню сучасних мережевих протоколів TCP/IP, IPv6, SD-WAN та технологій 5G/6G, супутникові канали активно застосовуються для трансляції теле- та радіомовлення (DVB-S2X), VoIP-телефонії, потокового відео та аудіо, забезпечення захищеного голосового зв'язку, передавання критично важливих даних, визначення місцеположення (GNSS, Galileo, BeiDou) та забезпечення доступу до глобальної мережі Інтернет. Зокрема, такі мережі як Starlink, OneWeb, SES O3b, Telesat Lightspeed дозволяють реалізовувати супутниковий інтернет з низькою затримкою (LEO broadband), що значно розширює можливості як комерційного, так і урядового сектору, зокрема в оборонній сфері, рятувальних операціях та автономних системах керування.

Отже аналіз використання провідними країнами світу ССЗ показав наступне:

ССЗ відіграють критично важливу роль у забезпеченні зв'язку на державному, стратегічному, оперативному та тактичному рівнях, що особливо актуально в умовах сучасних гібридних конфліктів та інформаційних війн;

кількість абонентів супутникового зв'язку стрімко зростає, що зумовлює розширення орбітального угруповання космічних апаратів, які активно застосовуються в військових операціях, миротворчих місіях, надзвичайних ситуаціях та цивільних комунікаційних системах;

сучасні ССЗ базуються на використанні КА на всіх видах навколоземних орбіт (LEO, MEO, GEO, NEO), включаючи як військові, так і комерційні платформи, що належать міжнародним корпораціям та урядам різних країн;

ССЗ забезпечують широкий спектр комунікаційних послуг, включаючи фіксований, мобільний, тактичний, а також широкосмуговий супутниковий

зв'язок для збройних сил, урядових установ, приватного сектору та цивільного населення;

геостаціонарні супутники залишаються основою глобальних систем зв'язку, зокрема в C, X та Ku-діапазонах, однак стрімке розширення низькоорбітальних (LEO) та середньоорбітальних (MEO) систем (Starlink, OneWeb, SES O3b, Telesat Lightspeed) змінює баланс у галузі супутникового зв'язку, забезпечуючи низьку затримку та високу пропускну здатність каналів;

використання багатостанційного доступу у сучасних ССЗ є гнучким та адаптивним, включаючи закріплені канали, динамічний розподіл частотного ресурсу (DAMA, FDMA, TDMA), а також доступ до каналів за запитом;

значне збільшення кількості доступних супутникових каналів створює виклики для систем радіомоніторингу, оскільки повне охоплення усіх каналів засобами спостереження та перехоплення однієї країни стає неможливим без застосування новітніх технологій штучного інтелекту [35, 41].

Крім того співвідношення чисельності КА, що застосовувались у військових конфліктах та КА зв'язку сучасності демонструє (див. рис. 1.1), що значення радіомоніторингу ССЗ постійно підвищується особливо при організації бойових дій.

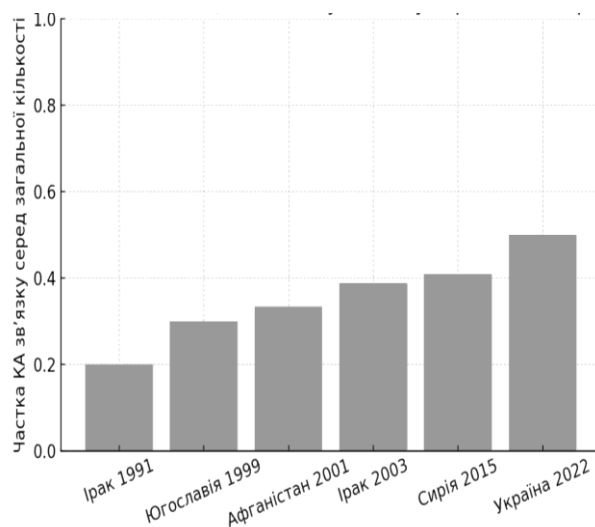


Рисунок 1.1 - Співвідношення чисельності КА зв'язку, що застосовувались у збройних конфліктах сучасності до КА загальної кількості

### 1.1.2. Аналіз використання засобів радіомоніторингу супутникових систем зв'язку

У сучасних умовах застосування супутникових систем зв'язку набуває стратегічного значення як у мирний час, так і під час ведення бойових дій. Ці канали забезпечують безперервну передачу даних, голосу, відеоінформації та координат, особливо в умовах, коли наземна інфраструктура зруйнована або недоступна. У зв'язку з цим контроль за використанням супутникових систем, виявлення сторонніх сигналів, перехоплення та аналіз каналів зв'язку є надзвичайно важливими. Ці функції виконує система радіомоніторингу, яка є складовою частиною радіоелектронної розвідки та боротьби.

Організаційно радіомоніторинг ССЗ у Збройних Силах України реалізується на декількох рівнях — стратегічному, оперативно-тактичному та тактичному. На стратегічному рівні діють спеціалізовані центри радіотехнічної розвідки та радіоелектронної боротьби, які здійснюють постійний контроль за радіочастотним спектром, що використовується супутниковими системами. Вони оснащені потужними антенними системами, спектроаналізаторами, приймальною апаратурою та програмними засобами обробки сигналів. Такі центри здатні виявляти джерела випромінювання, ідентифікувати типи супутникового зв'язку (наприклад, Starlink, Inmarsat, Thuraya) та здійснювати централізовану обробку отриманих даних.

На оперативно-тактичному рівні функціонують мобільні групи радіоелектронної розвідки, які входять до складу військових частин. Ці групи застосовують комплекси, здатні виявляти, аналізувати і пеленгувати сигнали супутникового зв'язку у діапазонах від кількох сотень МГц до десятків ГГц. Серед таких засобів — мобільні платформи типу “Буковель”, що можуть не лише виявляти сигнали, але й здійснювати глушіння супутникового каналу, а також переносні комплекси “Пластун-РП3000”, призначені для пеленгації джерел сигналу. Також використовуються комерційні аналізатори спектру (наприклад, Rohde & Schwarz), що дозволяють детально досліджувати

параметри модуляції, ширину смуги сигналу, тип протоколу передачі тощо [11].

На тактичному рівні, у складі батальйонів і рот, діють групи з портативними або легкокомобільними засобами моніторингу. Їх основна мета — оперативне виявлення супутникових терміналів, які можуть використовуватись противником на передовій. Такі комплекси фіксують сигнали супутникового зв'язку, визначають їхню частотну приналежність і географічне положення джерела випромінювання. У випадку виявлення ворожої активності ці дані передаються до вищого командування для прийняття подальших рішень — технічних (глушіння, створення перешкод) або бойових (знищення об'єкта) [18, 26].

Основними показниками оперативно-технічних можливостей постів радіомоніторингу ССЗ є: діапазон частот; тип антено-приймального тракту; кількість приймальних трактів; смуга частот прийому кожного тракту; тип реалізованих демодуляторів; режими обробки сигналів; кількість АРМ технічного аналізу; бойовий розрахунок і загальна кількість особового складу, яка необхідна для забезпечення функціонування поста.

Пости радіомоніторингу супутникових систем зв'язку виконують низку функціональних завдань, серед яких:

- виявлення та перехоплення радіосигналів ССЗ згідно із поставленим завданням;

- проведення технічного аналізу сигналів з метою виявлення повідомлень різних типів, що передаються супутниковими каналами;

- оцінювання інформативності виявлених каналів зв'язку та підготовка пропозицій щодо доцільності їх подальшого спостереження;

- збереження, відтворення (прослуховування або перегляд) та обробка отриманої інформації;

- первинна обробка отриманих даних з метою передачі їх у відповідні органи аналізу та прийняття рішень.

Таблиця 1.3 - Основні ТТХ комплексів радіомоніторингу ССЗ.

№ з/п	Назва комплексу	Діапазон частот, ГГц	Типи сигналів	Можливості	Примітки
1.	“Буковель-AD”	0.3 – 6.0	GPS, Inmarsat, Iridium, Starlink	Виявлення, глушіння, пеленгування	Мобільний, на базі авто
2.	“Пластун-РПЗ000”	0.1 – 18.0	Усі типи цифрових і аналогових сигналів	Пеленгування, технічний аналіз	Переносний, автономне живлення
3.	R&S ESMD (Rohde & Schwarz)	0.01 – 26.5	DVB-S/S2, VSAT, GPS, телеметрія	Спектральний аналіз, запис сигналу	Стаціонарний або мобільний
4.	Krypto1000 (Elint)	Залежить від приймача	Зашифровані та відкриті сигнали	Декодування, спектр. розбір	Програмний комплекс
5.	Signal Observer	0.3 – 3.0	VoIP, супутник, Wi-Fi	Аналіз IP-трафіку, декодування	Використовується з антенами

Яскравим прикладом є використання супутникового інтернету Starlink під час бойових дій в Україні. Відомі випадки, коли як ЗСУ, так і сили рф активно використовували термінали Starlink для організації польового зв'язку. Це спричинило необхідність посиленого контролю за Ku-діапазоном (10.7–12.7 ГГц), у якому працюють ці системи. Мобільні групи радіомоніторингу за допомогою спектроаналізаторів фіксували активність терміналів, а також ідентифікували координати їх розташування шляхом радіопеленгування. Отримані дані використовувалися як для технічного блокування каналів, так і для точкового вогневого ураження.

У процесі реалізації заходів радіомоніторингу підрозділи стикаються з низкою проблем, серед яких — висока щільність спектра, зашифровані канали, нові типи модуляцій, а також складність виявлення джерел у LEO-мережах із сотнями активних супутників.

Одним з основних показників ефективності ведення радіомоніторингу є повнота охоплення об'єкта. Цей показник визначає ступінь забезпечення

виявлення, перехоплення та аналізу всіх радіоелектронних випромінювань, що виходять від заданого об'єкта (наземного пункту управління, супутникового терміналу, мобільного передавача тощо). Повнота охоплення оцінюється за кількома критеріями: часом активності об'єкта, просторовим охопленням (зона прийому), частотним діапазоном та здатністю засобів радіомоніторингу ідентифікувати всі типи сигналів, що використовуються [2].

Чим вищий рівень охоплення — тим більше шансів вчасно виявити важливу інформацію про наміри або дії противника. Неповне охоплення може призвести до втрати ключових радіоелектронних джерел, що, у свою чергу, негативно вплине на прийняття оперативних рішень. Тому при плануванні та розгортанні засобів РЕР пріоритет надається саме досягненню максимальної повноти охоплення з урахуванням рельєфу місцевості, характеристик об'єкта та засобів, які він застосовує.

У загальному вигляді визначається за формулою:

$$K_{ох} = \frac{n_B}{n_3}, \quad (1.1)$$

де:

- $n_B$  - кількість виявлених каналів випромінювання об'єкта;
- $n_3$  - загальна кількість каналів, які використовує об'єкт.

Бортова апаратура як військових, так і цивільних космічних апаратів зв'язку зазвичай оснащується кількома приймально-передавальними трактами (стволами), що дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість абонентів. Таке технічне рішення забезпечує просторове та частотне розділення каналів, що підвищує ефективність використання радіочастотного ресурсу. Завдяки застосуванню методів мультиплексування, а також частотного та часового ущільнення, кожен окремий ствол здатен підтримувати функціонування сотень незалежних каналів зв'язку [8].

З урахуванням наявних можливостей постів радіомоніторингу супутникових систем зв'язку, кількості космічних апаратів, що функціонують у діапазонах С та Ku, а також обсягу організованих через них каналів передачі даних, виконання поставлених завдань потребує високої оперативності та достовірності добутої інформації.

Водночас забезпечити одночасне спостереження за всією сукупністю супутникових каналів практично неможливо через обмежені ресурси наявних технічних засобів радіомоніторингу. У зв'язку з цим, основним завданням при організації роботи постів радіомоніторингу є раціональний розподіл засобів та сил для досягнення максимальної ефективності та своєчасності збору інформації з супутникових каналів.

Організація радіоперехоплення передбачає розроблення плану дій посадових осіб, який визначає порядок застосування наявних технічних засобів і персоналу. Такий план формується командиром підрозділу у вигляді рішення на застосування підпорядкованих йому сил і засобів, із чітким визначенням пріоритетів спостереження, зон моніторингу та послідовності дій при виявленні радіоелектронної активності. [11].

Добування інформації на постах радіомоніторингу супутникових систем зв'язку є послідовним та багатоетапним процесом, що включає систематичний пошук, спостереження, перехоплення, аналіз і документування супутникових каналів передачі даних. З урахуванням сучасного рівня технічного розвитку засобів зв'язку противника, а також високої динаміки змін у частотному спектрі, робота постів радіомоніторингу організовується за наступною схемою:

1. Отримання завдання.

Пост радіомоніторингу отримує завдання на пошук або спостереження за конкретним об'єктом, частотним діапазоном або супутниковою системою (наприклад, Starlink, Inmarsat, Thuraya).

2. Пошук радіосигналів у заданому діапазоні.

Використовуючи спектроаналізатори або широкосмугові приймачі, особовий склад здійснює первинне сканування ефіру з метою виявлення активних каналів зв'язку.

### 3. Виявлення та фіксація сигналу супутникового зв'язку.

При виявленні характерного сигналу — він фіксується, зберігається, і проводиться подальша технічна ідентифікація (тип модуляції, протокол, ширина смуги тощо).

### 4. Пеленгування джерела сигналу.

Здійснюється визначення напрямку або географічного положення супутникового терміналу або передавача.

### 5. Перехоплення та технічний аналіз вмісту.

У разі можливості — проводиться дешифрування, демодуляція або структурний аналіз даних, що передаються, з метою добування розвідувальної інформації.

### 6. Оцінка важливості каналу та постановка його на спостереження.

Якщо канал має розвідувальну цінність — він вноситься до списку пріоритетних, по ньому організовується довготривале спостереження.

### 7. Формування звіту та передача результатів.

Оброблена інформація передається до вищого командування або аналітичного підрозділу для прийняття рішень.

Добування інформації на постах радіомоніторингу супутникових систем зв'язку є поетапним процесом, який включає пошук, контроль, аналіз та оцінювання супутникових каналів передачі даних. На сьогодні цей процес реалізується за наступною схемою:

відповідно до отриманого завдання здійснюється розподіл наявних сил, технічних засобів і часових ресурсів поста радіомоніторингу між трьома напрямками: пошук нових каналів зв'язку, виявлення каналів зі зміненими параметрами, а також підтвердження активності каналів, визначених у завданні;

виявлені канали, параметри або структура яких не можуть бути ідентифіковані стандартними методами, підлягають поглибленому технічному аналізу;

після технічного аналізу канали оцінюються з точки зору їхньої інформаційної цінності та, за потреби, ставляться на постійне або періодичне спостереження;

за результатами спостереження формується звітна інформація, яка передається у відповідні аналітичні або управлінські структури для подальшого використання в інтересах управління, планування або вогневого ураження.

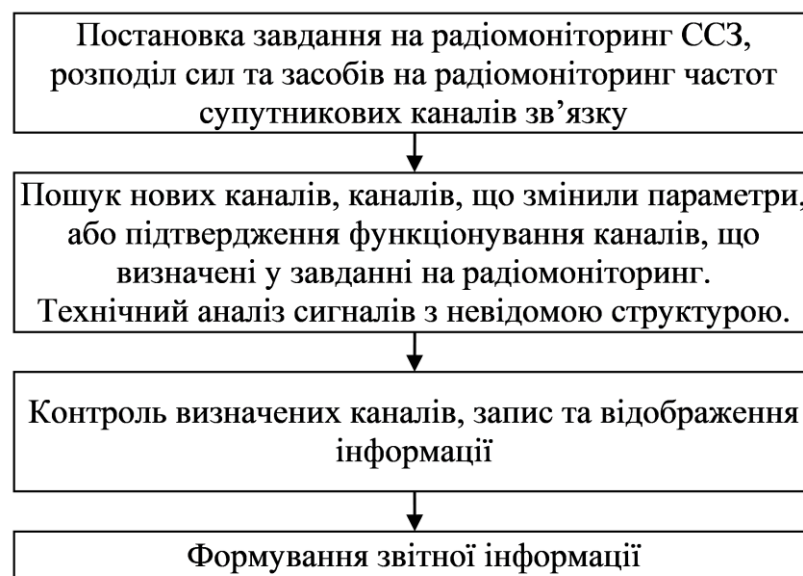


Рисунок - 1.2 Схема добування інформації на постах радіомоніторингу ССЗ

На постах радіомоніторингу ССЗ добування розвідувальної інформації є основним етапом процесу радіомоніторингу. Це складний процес перетворення потоку інформації, що міститься у вигляді радіовипромінювань високої частоти, у смислову інформацію, яка пройшовши відповідну обробку відображається у інформаційних документах. Потік проходить через різні етапи обробки, на кожному з яких він певним чином видозмінюється.

Кожен етап обробки інформаційного потоку при добуванні є комплексом заходів, що відбувається на постах радіомоніторингу ССЗ. Етапи між собою певним чином пов'язані і у формальному вигляді описуються інформаційною мережею.

У сучасних умовах, коли супутникові системи зв'язку активно використовуються як у військовій, так і в цивільній сфері, добування інформації на постах радіомоніторингу ССЗ залишається першим і одним із ключових етапів процесу ведення радіомоніторингу. Це багаторівневий і технологічно складний процес, що полягає в перетворенні електромагнітних сигналів високої частоти, які надходять із супутникових каналів, у смислову та придатну до подальшого аналізу інформацію. Отримані дані проходять через низку етапів обробки — від виявлення та фіксації до технічного аналізу, дешифрування, класифікації та структуризації.

На кожному з етапів потік інформації зазнає відповідних перетворень, що забезпечують підвищення його інформативності та придатності до прийняття рішень. Кожен з етапів обробки представляє собою комплекс заходів, які реалізуються із застосуванням спеціалізованих технічних засобів та програмного забезпечення на постах радіомоніторингу ССЗ. Взаємозв'язки між цими етапами формують інформаційну модель (мережу) обробки, яка дозволяє забезпечити послідовність, узгодженість і логічну завершеність процесу добування інформації.

Процес радіомоніторингу супутникових систем зв'язку є багаторівневою структурою, що охоплює технічну, аналітичну та організаційну складові. Він базується на комплексному застосуванні сучасних засобів радіоперехоплення, обробки сигналів та аналізу інформаційного потоку. Схема процесу умовно поділена на десять взаємопов'язаних етапів:

налаштування антено-приймального тракту на визначений космічний апарат та радіоперехоплення сигналу (визначення конкретного супутника, напрямку антени та діапазон частот, після чого здійснюється первинне приймання радіовипромінювання);

спектральний аналіз сигналу та виділення окремих каналів передачі даних у межах ствола (аналіз структури спектру, виявлення активних носіїв, визначення типу модуляції та ширини каналу);

вибір пріоритетного каналу для подальшого аналізу (канал може обиратись на основі попередніх даних, характеру активності або за ознаками зміни параметрів);

демодуляція, декодування, дескремблювання та демультимплексування (на цьому етапі сигнал перетворюється з аналогової або модуляційної форми у цифрову з розділенням на інформаційні потоки);

протокольна обробка каналу - виділення логічних пакетів, повідомлень, команд або телеметрії (визначаються протоколи, які використовуються (наприклад, TCP/IP, DVB-S2, VoIP) та відновлюється структура трафіку);

технічний аналіз сигналу - включає параметричну оцінку, визначення типу передавача, характеру трафіку, можливої криптографії;

оцінювання каналу - визначення його цінності;

запис та відображення смислової інформації, яка проходить через канал.

тривале (періодичне) спостереження каналу у разі, якщо він визнаний важливим або підозрілим;

формування висновків про функціонування об'єкта, з подальшим доведенням інформації до аналітичних органів або командування.

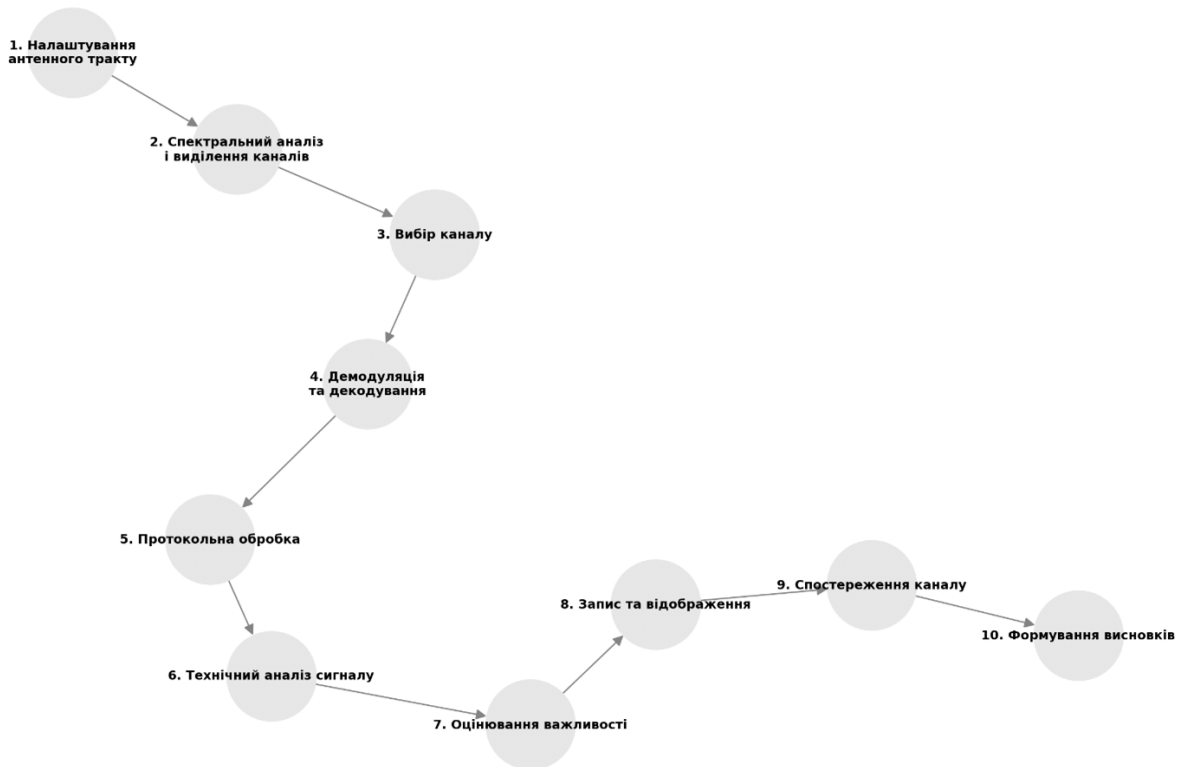


Рисунок - 1.3 Граф етапів процесу радіомоніторингу ССЗ.

Процес пошуку супутникових систем зв'язку реалізується через послідовне налаштування на супутникові канали передачі даних, підбір їхніх основних параметрів і характеристик з подальшим технічним аналізом. У результаті цього процесу здійснюється виділення смислової інформації та формування висновків щодо доцільності подальшого спостереження за окремими каналами (відповідає етапам 3–7, див. рис. 1.3).

З огляду на те, що кількість потенційно активних каналів у стволі супутника може значно перевищувати можливості поста (засобу радіомоніторингу), а також через наявність невизначеності щодо структури та параметрів сигналів, то до ключових показників ефективності процесу пошуку належать такі величини, як час обробки одного каналу та ймовірність правильного розпізнавання супутникового каналу зв'язку.

Наступним етапом ведення радіомоніторингу ССЗ є спостереження, в ході якого канали передачі даних, які становлять інтерес та важливість, ставлять на спостереження.

Процес спостереження в межах радіомоніторингу супутникових систем зв'язку полягає у вилученні смислової інформації з каналів передачі даних шляхом періодичного контролю заданих частот. Ці частоти можуть бути як визначені у завданні, так і виявлені в ході попереднього пошуку. Спостереження здійснюється на автоматизованих робочих місцях радіоперехоплення шляхом налаштування програмно-апаратного комплексу на конкретні канали з відомими технічними параметрами та характеристиками. Такий підхід забезпечує можливість тривалого або періодичного збору інформації з метою подальшого аналізу, документування та оцінювання активності супутникових засобів зв'язку противника.

Таким чином, пошук і спостереження супутникових систем зв'язку здійснюються за допомогою одних і тих самих технічних засобів, що в умовах великої кількості джерел радіовипромінювання (супутникових каналів передачі даних) потребує чіткої організації та оптимального розподілу ресурсів поста.

У результаті розподілу наявних засобів радіомоніторингу супутникових систем зв'язку за визначеними завданнями, об'єктами спостереження та джерелами радіовипромінювання, повинні бути чітко встановлені наступні параметри:

- перелік пріоритетних об'єктів моніторингу, з урахуванням їхнього оперативного значення, інтенсивності використання супутникового зв'язку та ймовірного рівня загрози;

- конкретні технічні засоби, які залучаються до виконання завдань щодо кожного об'єкта або групи каналів (АРМ, антено-приймальні комплекси, модулі аналізу);

- частотні діапазони та параметри каналів, на яких буде зосереджено увагу в межах доступного спектра;

- режим функціонування постів (періодичне або безперервне спостереження, часові вікна активності, циклічність пошуку);

відповідальні виконавці або чергові зміни, які здійснюють контроль за окремими напрямками радіомоніторингу;

інформаційні канали зв'язку та звітності — порядок передачі отриманих даних до органів управління чи аналітичних підрозділів.

Проведений аналіз особливостей функціонування супутникових систем зв'язку та практики застосування засобів радіомоніторингу показав, що на розробку планів добування інформації з каналів ССЗ впливає низка ключових факторів. До основних з них належать:

кількість та тип супутникових каналів, що можуть використовуватись противником, а також їхнє просторове та частотне розташування у спектрі;

можливості технічних засобів поста радіомоніторингу, зокрема діапазон роботи, чутливість приймальної апаратури, кількість одночасно контрольованих частот та рівень автоматизації обробки сигналів;

часовий ресурс, що може бути виділений на пошук і спостереження, враховуючи обмеження щодо тривалості роботи поста, енергоживлення, ротації персоналу тощо;

наявність попередніх розвідувальних даних, які дозволяють звузити зону пошуку і сконцентрувати зусилля на найбільш імовірних ділянках спектра чи конкретних супутниках;

змінність радіоелектронної обстановки, зокрема маневрування супутників, зміна параметрів каналів, використання адаптивних та малопомітних типів модуляції;

пріоритетність об'єктів спостереження, відповідно до бойової обстановки, завдань вищого командування та поточної розвідувальної обстановки.

Можливими варіантами підвищення ефективності ведення радіомоніторингу супутникових систем зв'язку є:

оптимізація розподілу ресурсів поста радіомоніторингу відповідно до пріоритетності об'єктів, завдань та наявного технічного забезпечення;

впровадження автоматизованих систем управління пошуком і спостереженням, що дозволяють зменшити час на прийняття рішень та збільшити кількість одночасно оброблюваних каналів;

модернізація технічних засобів радіоперехоплення і аналізу, зокрема застосування приймачів із широкою смугою пропускання, SDR-технологій та адаптивного аналізу сигналів;

застосування інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів (AI/ML) для автоматичної класифікації, ідентифікації та фільтрації супутникових сигналів на основі накопиченого досвіду;

розширення інформаційного обміну між постами радіомоніторингу, у тому числі через централізовані бази даних сигналів, що дозволяє уникати дублювання зусиль та оперативно реагувати на зміну обстановки;

залучення мобільних і автономних платформ радіомоніторингу, що дозволяє оперативно змінювати розташування постів залежно від задач і зони покриття супутникових сигналів.

Визначена (обмежена) кількість постів радіомоніторингу спонукає здійснювати підвищення ефективності радіомоніторингу за рахунок розробки науково-методичного апарату розподілу засобів, що враховував би існуючі умови та вимоги.

Попри стрімкий розвиток супутникових технологій та засобів радіомоніторингу, на сьогодні процес розподілу ресурсів перехоплення супутникових каналів, як правило, здійснюється емпіричним шляхом. Він значною мірою залежить від індивідуального досвіду, інтуїції та рівня підготовки оператора. У практичній діяльності часто відсутні чітко формалізовані критерії чи алгоритми, що забезпечували б обґрунтоване прийняття рішень щодо пріоритетності обробки каналів, черговості спостереження чи глибини технічного аналізу.

Крім того, у наявній відкритій науково-технічній літературі відсутній цілісний науково-методичний апарат, який би системно описував принципи,

алгоритми та критерії ефективного розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ в умовах багатоканального середовища.

У зв'язку з цим, актуальним є формування наукового підходу до розробки такого апарату, що дозволить оптимізувати процеси радіомоніторингу супутникових каналів зв'язку, підвищити ефективність функціонування постів радіомоніторингу та забезпечити адаптивність до обстановки, що змінюється.

## 1.2. Критерії та показники оцінювання ефективності ведення радіомоніторингу каналів ССЗ

Оцінювання ефективності систем радіомоніторингу каналів супутникового зв'язку є важливою складовою управління сучасними засобами технічного контролю радіочастотного спектра. У контексті зростання обсягів переданої інформації через супутникові канали та збільшення кількості космічних апаратів, завдання точного, своєчасного і ресурсооптимального моніторингу набуває особливого значення. Ефективність таких систем доцільно оцінювати на основі комплексу критеріїв, що охоплюють технічні, часові, інформаційні та ресурсні показники.

Одним із базових критеріїв є повнота покриття простору частотного діапазону та географічної зони спостереження, яка характеризує здатність системи здійснювати надійний контроль усіх потенційно активних частот та територій, де можливе функціонування ССЗ. Частотне покриття вимірюється відношенням сумарної ширини охоплених піддіапазонів до ширини усього необхідного частотного діапазону. Географічне покриття, своєю чергою, визначається як відсоткове співвідношення реально охопленої площі спостереження до заданої зони відповідальності. Для інтегральної оцінки обидва показники можуть бути зважені за допомогою відповідного коефіцієнта вагомості.

Ключовим технічним критерієм є ймовірність виявлення сигналу, що визначає здатність системи коректно реєструвати наявність сигналу в присутності шумів та завад. Її значення тісно пов'язане з ймовірністю хибної тривоги, яка вказує на відсоток помилкової реєстрації сигналу у разі відсутності реального. Оптимізація системи повинна досягати балансу між цими двома ймовірностями для мінімізації загальної помилки детектування. Обидва показники є функцією відношення сигнал/шум та порогових значень у алгоритмах обробки.

Час реакції системи — це інтегральний часовий показник, який включає затримки сканування частотного простору, обробки та класифікації сигналу. Чим менший цей показник, тим швидше система здатна надати релевантну інформацію для прийняття рішень або ініціювати протидію. Зменшення є критично важливим у реальному часі, зокрема у випадках короткочасного використання частот противником або сплесків активності у вузьких частотних діапазонах.

Ще одним важливим аспектом є точність ідентифікації та класифікації сигналів, що відображає здатність системи не лише виявити наявність сигналу, але й правильно визначити його тип, стандарт, модуляцію, джерело або приналежність до певної супутникової системи. Наявність високоточної бази шаблонів сигналів, алгоритмів машинного навчання або експертних систем дозволяє суттєво підвищити рівень автоматизації цього процесу.

Не менш суттєвим є критерій ефективності використання ресурсів, який оцінює, наскільки оптимально система задіює доступні апаратні, енергетичні та обчислювальні ресурси. При фіксованому бюджеті ресурсу важливо досягти максимального охоплення і точності з мінімальними витратами. Такий критерій часто описується як відношення результативності до ресурсоспоживання.

Для комплексного підходу до оцінювання ефективності системи доцільно використовувати узагальнену зважену функцію ефективності:

$$E = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x) \quad (1.2)$$

де  $f_i(x)$  — нормалізовані функції окремих показників (наприклад,  $Pd$ ,  $1/P_f$ ,  $1/T_{resp}$ ,  $C_{total}$ ), а  $w_i$  — вагові коефіцієнти їхньої важливості, що задаються експертно або за результатами функціонального моделювання.

Ефективність системи радіомоніторингу каналів супутникового зв'язку, а також її окремих підсистем і технічних засобів, є інтегральна здатність забезпечувати виконання функціональних завдань та досягнення визначених цілей радіомоніторингу у встановлені терміни з максимально можливою повнотою охоплення частотного простору і території, а також з високою достовірністю отриманої інформації.

З огляду на те, що процес радіомоніторингу каналів супутникового зв'язку відбувається в умовах часткової або повної невизначеності вхідних даних (нестача інформації про тип сигналу, його джерело, параметри завад тощо), базовим математичним інструментарієм для оцінювання ефективності систем виступають методи статистичного аналізу, математичного та імітаційного моделювання. У такому випадку при дослідженні ефективності технічних засобів і комплексів радіомоніторингу доцільно застосовувати систему формалізованих правил прийняття рішень, серед яких найбільш поширеними є наступні: (правило мінімаксного критерію (критерій Вальда), правило Байєса (середньостатистичний підхід), правило максимальної правдоподібності, критерій Неймана–Пірсона, правило мінімізації ризику (мінімум втрат).

Ефективність системи радіомоніторингу розглядається як функціональна залежність від реальних показників бойових можливостей сил і засобів, що залучаються до виконання завдань моніторингу. Іншими словами, ефективність можна подати у вигляді узагальненої функції:

$$E = f(B_1, B_2, \dots, B_n) \quad (1.3)$$

де:

- $E$  — ефективність застосування системи радіомоніторингу;
- $B_i$  — бойові можливості конкретних підсистем або засобів;
- $n$  — кількість врахованих факторів.

До бойових можливостей радіомоніторингу належать наступні ключові параметри, що безпосередньо впливають на загальну ефективність системи: дальність виявлення сигналів, частотна область, у якій засіб здатен ефективно здійснювати моніторинг, точність вимірювання параметрів сигналів, час реакції системи, пропускна здатність, ймовірність виявлення, ймовірність правильної реєстрації наявності сигналу у контрольованій смузі, ймовірність хибної тривоги, ймовірність помилкового спрацювання системи, завадостійкість, стійкість роботи засобу в умовах активної або пасивної радіоелектронної протидії, мобільність та прихованість, автономність і живучість.

Таким чином, радіомоніторинг оцінюється за п'ятьма групами показників: просторовими, часовими, інформаційними, ймовірнісними, показниками точності та іншими. Інформаційні та ймовірнісні показники доцільно об'єднати в показники релевантності.

Просторові показники характеризують географічні та кутові межі дії системи радіомоніторингу. Вони визначають здатність засобів контролю забезпечити повне або часткове охоплення території спостереження з урахуванням розташування, напрямку дії антен, зони прямої видимості та топографії.

До основних просторових показників належать:

- площа ефективного покриття — реальна площа, в межах якої здійснюється стійкий радіоприйом та аналіз сигналів;

- щільність покриття — кількість засобів моніторингу на одиницю площі;
- сектор огляду — діапазон азимутів і кутів місця, в яких можливе виявлення сигналів;
- дальність виявлення — максимальна відстань до джерела, на якій зберігається здатність виявити сигнал;
- роздільна здатність за напрямком — мінімальний кут між джерелами, які можуть бути розділені системою;
- зона прямої видимості — зона, в якій немає екранування рельєфом чи іншими об'єктами.

Просторові показники повинні мати максимальні значення, оскільки чим більше охоплення і точність за напрямком — тим вищий потенціал системи до виявлення сигналів.

Часові показники оцінюють швидкість реагування системи на появу нового джерела сигналу. Вони охоплюють:

- $T_1$  — час виявлення джерела радіовипромінювання;
- $T_2$  — час розпізнавання джерела;
- $T_3$  — час визначення основних характеристик сигналу;
- $T_4$  — час встановлення технічних параметрів;
- $T_5$  — час обробки інформації;
- $C_{proc}$  — пропускна здатність.

Усі часові показники, окрім пропускної здатності, мають бути мінімальними, що забезпечує оперативність дій.

Релевантність оцінює значущість інформації, отриманої в процесі моніторингу, для досягнення поставленої мети. До таких показників належать:

- завантаження частотного діапазону — має бути оптимальним;
- кількість виявлених джерел — має бути максимальною для заданої зони;
- ймовірність виявлення ;
- ймовірність розпізнавання типу сигналу;

- достовірність виявлення нових джерел — вища достовірність підвищує оперативну цінність моніторингу.

Показники точності характеризують здатність системи до вимірювання та ідентифікації з високою деталізацією:

- точність визначення параметрів каналу зв'язку — оцінює відхилення від істинних значень;

- точність виявлення нових джерел — знижує імовірність пропуску;

- здатність розрізнення — дозволяє ідентифікувати сигнали, які мають схожі характеристики.

На основі перерахованих показників формується узагальнений функціонал оцінювання ефективності ведення радіомоніторингу каналів ССЗ:

$$E = f(S_{obs}, T_1, T_2, \dots, T_5, P_d, C_{proc}, \text{релевантність, точність}) \quad (1.4)$$

Цей функціонал враховує багатофакторну природу системи та дозволяє здійснювати комплексне оцінювання її дії в умовах реального часу.

Оцінювання ефективності ведення радіомоніторингу каналів ССЗ має базуватися на багатокритеріальному підході з урахуванням специфіки завдань, структури моніторингової системи, умов роботи та допустимого рівня ресурсних витрат. Врахування повного спектра критеріїв забезпечує об'єктивність оцінки, дозволяє виявляти слабкі місця у функціонуванні системи та формувати шляхи її оптимізації.

Ефективність розподілу технічних засобів радіомоніторингу при здійсненні контролю за каналами супутникового зв'язку пропонується оцінювати за допомогою ймовірнісно-часових критеріїв. До основних із них належать ймовірність правильного прийняття рішення та час, необхідний для його прийняття.

Такий підхід дозволяє не лише кількісно охарактеризувати точність обраної конфігурації розміщення засобів, але й враховувати динамічність зміни обстановки у супутниковому сегменті. Аналіз ефективності з

урахуванням цих параметрів сприяє побудові адаптивних моделей розподілу засобів моніторингу, орієнтованих на мінімізацію затримок виявлення загроз і максимізацію достовірності прийнятих рішень.

1.3. Аналіз наявних підходів до розподілу технічних засобів радіомоніторингу для здійснення спостереження за джерелами інформації.

Задача розподілу засобів спостереження на постах радіомоніторингу є надзвичайно складною. Це зумовлено низкою факторів, серед яких: значна кількість об'єктів спостереження (моніторингу) та джерел радіовипромінювання, що підлягають виявленню й контролю; відсутність достовірної апріорної інформації щодо параметрів сеансів зв'язку, їхньої тривалості та характеристик супутникових каналів передачі даних; велика кількість можливих варіантів розподілу наявних сил і засобів; а також обмеженість часу, відведеного на прийняття та реалізацію відповідного рішення.

На даний час відсутні методики, які безпосередньо призначені для розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, тому розглянемо існуючі загальні методики розподілу засобів на спостереження.

Організація ефективного розподілу засобів на спостереження є одним із ключових завдань при побудові систем виявлення та контролю, зокрема каналів супутникового зв'язку. У зв'язку з обмеженістю ресурсів, складністю обстановки та значною динамічністю ефіру, виникає необхідність застосування оптимізаційних підходів до визначення пріоритетів спостереження та просторового розміщення засобів.

Успішність виконання завдань спостереження значною мірою залежить від того, наскільки раціонально здійснено призначення кожного засобу на конкретну ціль або частину простору радіочастотного діапазону. У зв'язку з цим питання вибору оптимального підходу до розподілу засобів має

вирішальне значення як з точки зору досягнення заданого рівня ефективності, так і з огляду на обмеженість ресурсів.

Серед наявних у науково-технічній літературі та практиці підходів можна виділити кілька основних груп. Найбільш простими є детерміновані методи, що ґрунтуються на фіксованих алгоритмах, які реалізуються за попередньо встановленими правилами. Такі підходи передбачають призначення засобів відповідно до розподіленої сітки, покриття пріоритетних об'єктів або зон, визначених вхідними даними. Їхня перевага полягає в простоті реалізації, проте недоліком є низька адаптивність до змін у середовищі та неможливість гнучкого реагування на неочікувану активність. Ці методи базуються на фіксованих алгоритмах, які не враховують змін середовища або не адаптуються до нових умов. Вони передбачають заздалегідь визначене розміщення засобів за принципами:

- географічного покриття заданої зони;
- регулярного сканування фіксованих частот;
- пріоритезації об'єктів на основі вхідних даних.

Розглянемо деякі з основних:

#### 1. Принцип рівномірного розподілу

Нехай маємо:

- $M = m_1, m_2, \dots, m_m$  — множина засобів;
- $T = t_1, t_2, \dots, t_n$  — множина об'єктів (цілей) спостереження;
- $x_{ij} \in 0,1$  — змінна, яка вказує, чи призначено засіб  $m_i$  на об'єкт  $t_j$ .

Рівномірний розподіл передбачає, що кожен засіб відпрацьовує спостереження одного або кількох об'єктів за принципом рівного навантаження:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j \equiv i \pmod{\frac{n}{m}} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (1.5)$$

або, якщо кожен засіб контролює одну ціль:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j = i \text{ для } m = n \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (1.6)$$

2. Пріоритетний розподіл за заданими коефіцієнтами важливості

Нехай кожна ціль має певний ваговий коефіцієнт  $w_j \in [0,1]$ , що визначає її важливість.

Кількість засобів, що призначаються до цілі  $t_j$ :

$$k_j = \lfloor w_j \cdot M_{total} \rfloor \quad (1.7)$$

де  $M_{total}$  — загальна кількість доступних засобів.

3. Фіксоване розбиття простору або діапазону

Якщо діапазон частот або зона моніторингу розбивається на  $n$  секторів, і кожен засіб охоплює один сектор:

$$f_j = [F_{min} + (j - 1) \cdot \Delta f, F_{min} + j \cdot \Delta f], \Delta f = \frac{F_{max} - F_{min}}{n} \quad (1.8)$$

або:

$$S_j = [\Theta_{min} + (j - 1) \cdot \Delta \theta, \Theta_{min} + j \cdot \Delta \theta], \Delta \theta = \frac{\Theta_{max} - \Theta_{min}}{n} \quad (1.9)$$

Тоді кожен засіб  $m_i$  обслуговує лише  $S_j$  або  $f_j$  згідно зі схемою.

4. Матриця фіксованого призначення

Розподіл задається фіксованою бінарною матрицею  $X = [x_{ij}]$ , яку задає оператор або заздалегідь визначений шаблон:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Більш гнучкими є стохастичні та статистичні методи, що враховують імовірнісну природу появи джерел сигналів, рівень завад та динаміку радіоелектронної обстановки. Вони дозволяють приймати зважені рішення на основі апіорної або апостеріорної інформації, застосовують байєсівські правила, критерії максимізації очікуваної ефективності та методи статистичного прогнозування.

Розглянемо деякі з основних:

#### 1. Байєсівський підхід до прийняття рішення

Байєсівський підхід належить до класу методів прийняття рішень в умовах невизначеності та є одним із найпоширеніших у задачах розподілу ресурсів, зокрема технічних засобів радіомоніторингу. Його суть полягає в оновленні апіорних оцінок ймовірностей на основі отриманих спостережень та у прийнятті рішень, які максимізують апостеріорну імовірність правильного призначення засобів на цільові об'єкти.

В умовах, коли система має обмежений ресурс (наприклад, кількість антен або приймачів), необхідно розподілити ці засоби таким чином, щоб вони були спрямовані на ті об'єкти, які з найбільшою ймовірністю є активними або потенційно важливими джерелами інформації.

Для кожного можливого стану середовища  $H_j$ , імовірність того, що сигнал походить від джерела  $H_j$  при отриманому спостереженні  $x$ :

$$P(H_j | x) = \frac{P(x | H_j) \cdot P(H_j)}{\sum_{k=1}^n P(x | H_k) \cdot P(H_k)} \quad (1.11)$$

де:

- $P(H_j)$  — апіорна ймовірність появи сигналу з джерела  $H_j$ ;
- $P(x | H_j)$  — правдоподібність спостереження  $x$  при умові  $H_j$ ;

- $P(H_j | x)$  — апостеріорна ймовірність.

## 2. Критерій максимальної апостеріорної ймовірності

Використовується у задачах класифікації, виявлення сигналів і, зокрема, для прийняття рішень щодо розподілу технічних засобів радіомоніторингу в умовах невизначеності. Базується на результатах Байєсівського оновлення ймовірностей і дозволяє обрати найімовірніший стан або ціль на основі поточних спостережень.

У межах системи радіомоніторингу цей критерій дозволяє визначити, на яке джерело сигналу або частотний діапазон слід спрямувати засіб моніторингу, виходячи з максимальної апостеріорної ймовірності виникнення активності на ньому.

Рішення приймається на користь того джерела, яке має максимальну апостеріорну ймовірність:

$$H^* = \arg \max_j P(H_j | x) \quad (1.12)$$

## 3. Критерій Неймана–Пірсона:

Критерій Неймана–Пірсона є фундаментальним статистичним правилом для прийняття рішень в умовах альтернативних гіпотез, і широко застосовується у задачах виявлення сигналів, зокрема — в системах радіомоніторингу каналів супутникового зв'язку. Його головна мета — максимізувати ймовірність виявлення сигналу при фіксованому допустимому рівні хибної тривоги.

Для фіксованої ймовірності хибної тривоги  $P_f$ , рішення приймається, якщо:

$$\frac{p(x | H_1)}{p(x | H_0)} > \eta \quad (1.13)$$

де:

$H_1$  — гіпотеза про наявність сигналу;

$H_0$  — гіпотеза про відсутність сигналу;

$\eta$  — порогове значення, що залежить від допустимого рівня хибної тривоги.

У свою чергу, оптимізаційні та евристичні методи застосовуються тоді, коли задача розподілу ускладнюється великою кількістю об'єктів, обмеженими ресурсами та множиною взаємозалежних обмежень. Такі підходи формулюють задачу розподілу у вигляді математичної моделі з цільовою функцією, що підлягає максимізації або мінімізації, залежно від мети (наприклад, максимізація ймовірності виявлення, мінімізація часу реагування, збалансоване використання засобів). У рамках цього підходу активно застосовуються методи цілочислового програмування, динамічного та стохастичного програмування, а також евристичні алгоритми, як-от жадібний пошук, метод локального покращення, генетичні алгоритми, метод рою частинок, імітаційне тощо. Основною перевагою цих методів є здатність працювати у складних умовах великої розмірності, але вони часто вимагають значних обчислювальних ресурсів або попереднього налаштування параметрів.

Такі методи дозволяють приймати зважені рішення за наявності неповної інформації.

Оцінювання ефективності кожного підходу зазвичай здійснюється за такими показниками:

- ймовірність виявлення сигналу ( $P_d$ );
- середній час реакції ( $T_{resp}$ );
- ступінь просторового покриття ( $C_g$ );
- ефективність використання ресурсів ( $\eta$ );
- релевантність отриманої інформації;
- здатність до адаптації у динамічному середовищі.

Вибір методу залежить від умов задачі: типу середовища, кількості доступних засобів, рівня автоматизації, наявності даних тощо.

Ефективна система має базуватись на багатокритеріальному оцінюванні, бути здатною до гнучкої перенастройки та працювати в умовах невизначеності.

Найбільш базовим підходом до розподілу технічних засобів радіомоніторингу є ручний (експертний) метод. Його сутність полягає у поетапному складанні переліку джерел інформації для кожного об'єкта спостереження, оцінюванні їхньої важливості, визначенні пріоритетного виду спостереження (пошукового, періодичного чи безперервного), а також попередньому розподілі доступних засобів радіомоніторингу між цими об'єктами. Далі виконується перевірка відповідності наявного ресурсу запланованому обсягу робіт. У разі виявлення нестачі технічних засобів проводиться коригування: змінюється режим спостереження, окремі об'єкти можуть бути тимчасово виключені з плану, після чого здійснюється повторний розподіл із наступною перевіркою.

Такий підхід передбачає ітераційне наближення до оптимального (або допустимого) варіанту, за якого кількість спостережуваних джерел, типи спостереження і можливості наявних сил і засобів приведені у відповідність. Метод базується на досвіді фахівців і, хоча не гарантує загальної оптимальності, дозволяє отримати робоче рішення за обмеженого ресурсу та часу.

У якості основного показника оцінки варіантів розподілу використовується відсоток охоплення джерел інформації спостереженням.

Перевагою зазначеного підходу є його практична реалізованість, оперативність і низькі обчислювальні витрати. Проте метод має низку суттєвих обмежень. Насамперед, оцінювання якості розподілу здійснюється за спрощеними критеріями, без кількісного обґрунтування. Прийняття рішень має суб'єктивний характер і значною мірою залежить від досвіду та професійної підготовки оператора. Крім того, метод не передбачає

автоматизованої адаптації до змін обстановки, що унеможливорює своєчасний перерозподіл ресурсів у динамічних умовах або при зміні завдань.

Окрім базового ручного підходу, практичне застосування також отримав модифікований варіант, що реалізує метод послідовного наближення з урахуванням кількісних оцінок ефективності кожного з варіантів розподілу. У цьому випадку прийняття рішення базується не лише на експертних судженнях, а й на розрахунках — наприклад, за критеріями покриття, ймовірності виявлення, тривалості моніторингу або кількості об'єктів, які підлягають контролю.

Процедура реалізується ітераційно: спочатку формується первинна матриця розподілу засобів відповідно до попередніх даних, далі обчислюється інтегральна оцінка ефективності, після чого виконується часткова перебудова розподілу на основі заданих правил. На кожному етапі оцінюється приріст (або зниження) ефективності, і зміни приймаються лише у випадку позитивного результату. Таким чином, метод дозволяє поступово досягти рішення, яке є близьким до оптимального, але без використання повного перебору.

Зазначений підхід поєднує гнучкість експертного планування з елементами математичної формалізації, що забезпечує можливість урахування як оперативної обстановки, так і наявних ресурсних обмежень у більш обґрунтованому вигляді. На відміну від класичного способу послідовного наближення, цей метод дозволяє здійснювати розподіл засобів радіомоніторингу на основі кількісної оцінки доцільності та можливості виконання поставлених завдань.

До сучасних підходів у вирішенні задачі розподілу засобів радіомоніторингу належить метод, що базується на використанні скалярної згортки у межах нелінійної схеми компромісів. Відмінною рисою цього методу є формалізація проблеми у вигляді багатокритеріальної моделі, яка дозволяє комплексно враховувати взаємодію між ефективністю використання ресурсів і пріоритетами об'єктів спостереження.

Процес розподілу передбачає попереднє ранжування джерел і об'єктів радіомоніторингу згідно з заданими критеріями, після чого для кожного критерію будуються аналітичні залежності у вигляді таблиць або функцій. Отримані залежності апроксимуються методами найменших квадратів для подальшого використання у складі функції згортки. На основі цієї функції формується узагальнена оцінка, що дозволяє визначити оптимальну кількість постів радіомоніторингу відповідно до груп важливості об'єктів.

Основні переваги такого підходу полягають у:

- формалізованій структурі прийняття рішень;
- можливості адаптації під різні типи вихідних даних;
- автоматизації процедури оцінювання варіантів розподілу;
- урахуванні індивідуальних технічних характеристик засобів спостереження;
- можливості масштабування під змінні умови оперативної обстановки.

Завдяки поєднанню математичного апарату та прикладної значущості, цей підхід демонструє високу ефективність у ситуаціях, що вимагають швидкого та обґрунтованого прийняття рішень за обмежених ресурсів і складних умов дії.

Отже, аналіз існуючих підходів і методик розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження виявляє низку принципових обмежень та недоліків, що істотно знижують ефективність їх застосування у сучасних умовах. До ключових з них належать:

високий рівень суб'єктивності прийняття рішень — розподіл часто базується виключно на досвіді, інтуїції та особистих уподобаннях оператора поста радіомоніторингу, без належної формалізації;

неврахування комплексу об'єктивних факторів, які мають критичне значення для якості планування (наприклад, параметри об'єктів, радіоелектронна обстановка, ресурси сусідніх постів тощо);

відсутність чітких критеріїв для кількісного оцінювання варіантів розподілу, що унеможлиблює обґрунтоване порівняння рішень та вибір оптимального;

відсутність єдиної методики, яка б використовувала математичний апарат для підтримки процесу прийняття рішень і дозволяла оцінювати вплив різних факторів на результат розподілу;

обмежені можливості для автоматизації, що зумовлює зростання часу на планування, підвищує ймовірність помилок та знижує адаптивність системи;

нездатність до динамічного реагування на зміну умов обстановки, що особливо критично при моніторингу супутникових каналів із короткотривалими сеансами зв'язку;

використання застарілих нормативів навантаження, які не враховують сучасні технічні можливості засобів радіомоніторингу та реальні вимоги операційного середовища;

відсутність методичного забезпечення щодо розподілу ресурсів на рівні постів радіомоніторингу, що унеможлиблює повноцінне планування у масштабах системи.

Отже, результати аналізу існуючих підходів і методик розподілу засобів радіомоніторингу між завданнями, джерелами інформації свідчать про їхню недостатню ефективність в умовах невизначеності оперативної обстановки, особливо у контексті добування інформації з каналів супутникового зв'язку. Зазначені методики не відповідають сучасним вимогам до оперативності прийняття рішень і забезпечення їх достовірності.

Незважаючи на актуальність проблеми, на сьогодні відсутні ефективні алгоритмічні чи методичні засоби, які б забезпечували обґрунтований та гнучкий розподіл наявних засобів поста радіомоніторингу для спостереження за супутниковими каналами передачі даних. У зв'язку з цим постає необхідність розроблення нових або вдосконалення існуючих підходів на основі сучасного наукового інструментарію — таких як методи багатокритеріальної оптимізації, нечіткої логіки, машинного навчання тощо.

У зв'язку з цим постає задача розроблення оптимального плану розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, орієнтованого на підвищення результативності отримання інформації з супутникових каналів зв'язку за умов невизначеності та обмежених ресурсів.

1.4. Визначення оптимального плану розподілу засобів радіомоніторингу супутникових систем зв'язку: формулювання задачі дослідження.

Припустимо, що в межах зони огляду антенних систем поста радіомоніторингу супутникового зв'язку перебуває орбітальне угруповання  $N$  космічних апаратів, які функціонують у складі відповідних каналів зв'язку.

На кожному  $h$ -му супутнику, шляхом ведення радіомоніторингу, знайдено  $K_h$  каналів. Введемо обмеження, що місцеположення всіх супутників нам відомо, тоді сумарна кількість каналів радіомоніторингу, що необхідно

опрацювати буде складати 
$$K = \sum_{h=1}^N K_h .$$

Для ведення радіомоніторингу організовано пости, які мають  $A$  антенних систем та  $J$  засобів, при чому  $J \geq A$ ,  $A < N$  та  $J < K$ . Таким чином вхідними даними (умовою) буде ведення радіомоніторингу  $J$  засобами спостереження за  $K_h$  каналами.

Виникає необхідність розроблення раціонального плану роботи поста радіомоніторингу систем супутникового зв'язку, який би у межах заданого часу дозволяв охопити спостереженням усі виявлені супутникові канали передачі даних, а також забезпечував ефективний пошук нових джерел радіовипромінювання серед визначеної множини каналів. При цьому тривалість розробки такого плану не повинна перевищувати загальний час, відведений на прийняття рішення щодо проведення радіомоніторингу.

Актуальність створення подібного плану обумовлена тим, що сукупна кількість супутникових каналів, які підлягають моніторингу з метою добування інформації, суттєво перевищує обсяг наявних сил і засобів, що можуть бути задіяні на постах радіомоніторингу ССЗ. Це зумовлює потребу в ефективному управлінні наявним ресурсом та застосуванні оптимізаційних підходів для досягнення максимального покриття із мінімальними витратами часу та ресурсів.

План роботи поста радіомоніторингу систем супутникового зв'язку представляє собою формалізовану структуру, що включає два взаємопов'язані компоненти: план спостереження за відомими супутниковими каналами та план пошуку нових джерел радіовипромінювання. Метою побудови такого плану є досягнення максимальної ефективності добування інформації за обмежений проміжок часу та при обмеженій кількості технічних засобів.

План роботи поста радіомоніторингу ССЗ  $P$  є сукупністю планів пошуку  $P_{II}$  та плану спостереження  $P_{Cn}$ :

$$P \in [P_{II}, P_{Cn}]. \quad (1.14)$$

Під планом пошуку  $P_{II}$  будемо розуміти вектор призначень  $v_i$  ділянки частот, що охоплюють увесь робочий діапазон системи  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_L\}$  на кожне АРМ  $j_M$  зі всієї множини АРМ радіоперехоплення  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_M\}$ , визначених для пошуку:

$$v_i^{(n)} = [v_{i1}^{(n)}, v_{i2}^{(n)}, \dots, v_{iL}^{(n)}] \quad (1.15)$$

де:

$$v_{(iL)}^{(n)} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } f_l \in S_{\text{пошук}} \text{ і призначено на АРМ } j_i, \\ 0, \text{ якщо інакше} \end{cases}$$

$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iL}]$  — вектор призначення частотних ділянок  $f_l$  для  $i$ -го АРМ;

$v_{iL} \in \{0,1\}$  — ознака призначення: 1 — частота  $f_l$  обробляється АРМ  $j_i$ ,  
0 — ні;

$S_{\text{пошук}}$  — множина ділянок, визначених для пошуку.

Для спостереження за відомими каналами:

$$v_i^{(c)} = [v_{i1}^{(c)}, v_{i2}^{(c)}, \dots, v_{iL}^{(c)}] \quad (1.16)$$

де:

$$v_{il}^{(c)} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } f_l \in S_{\text{спост}} \text{ і призначено на АРМ } j_i, \\ 0, \text{ інакше} \end{cases}$$

$S_{\text{спост}}$  — множина ділянок, визначених для спостереження.

Загальний вектор призначень буде мати вигляд:

$$v_i = v_i^{(п)} \vee v_i^{(c)} \quad (1.16)$$

При чому на кожен момент часу кожне АРМ може контролювати не більше  $T$  ділянок:

$$\sum_{l=1}^L v_{il} \leq T, \forall i \in \{1, \dots, M\} \quad (1.17)$$

Частотні ділянки не повинні дублюватися між АРМ при одночасному призначенні:

$$\sum_{i=1}^M v_{il} \leq 1, \forall l \in \{1, \dots, L\} \quad (1.18)$$

Задачі знаходження планів пошуку та спостереження пов'язані між собою загальним ресурсом АРМ радіоперехоплення:

$$J_{\Pi} + J_{Cn} = J. \quad (1.19)$$

Для формування раціонального плану розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ доцільно застосовувати підхід, що ґрунтується на мінімізації втрат під час вибору варіантів плану та одночасній максимізації ефективності процесу пошуку нових джерел радіовипромінювання.

Результативність такого підходу значною мірою визначається швидкістю оцінювання джерел сигналів. У зв'язку з цим, ключовою вимогою до оператора АРМ радіоперехоплення є забезпечення високої оперативності під час класифікації каналів за важливістю, за умови збереження необхідного рівня достовірності аналізу.

Таким чином, задачу вибору раціонального плану розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження систем супутникового зв'язку  $P$  можна сформулювати як оптимізаційну. Необхідно обрати такий варіант плану, який у межах допустимого часу  $T_0$  забезпечить охоплення максимальної кількості пріоритетних каналів зв'язку  $K$ . При цьому час, необхідний для формування самого плану, повинен бути мінімальним, а рівень повноти охоплення об'єктів  $D$  - максимально можливим за наявних ресурсних і часових обмежень.

Отже, завдання вибору раціонального плану розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження ССЗ можна сформулювати таким чином: необхідно обрати такий план розподілу, який забезпечуватиме за допустимий час  $T_0$  охоплення максимальної кількості важливих  $W_i$  каналів, а час на розробку такого плану  $T_{вик}$  буде мінімальним при забезпеченні максимальної повноти охоплення об'єктів  $P_k$ :

$$P \rightarrow P_q = \left[ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N K_h \rightarrow \max \\ T \rightarrow \min \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} T \leq T_\delta; \\ D = \frac{\sum_{i=1}^N K_i}{\sum_{c=1}^R K_c} = \max. \end{array} \right. \quad (1.20)$$

де  $q$  – варіанти вибору плану.

З огляду на те, що прийняття рішень у радіомоніторингу ССЗ здійснюється в умовах високої невизначеності та постійної зміни оперативної обстановки, традиційні методи розподілу засобів, засновані на фіксованих алгоритмах, можуть бути недостатньо ефективними. Ситуація ускладнюється тим, що сучасні супутникові канали передачі даних часто мають короткочасні або неструктуровані сеанси зв'язку, що ускладнює прогнозування їхніх параметрів і подальший розподіл засобів радіомоніторингу. У таких умовах необхідно шукати гнучкі та адаптивні методи, які дозволяють оперативно реагувати на зміни обстановки й максимально використовувати наявні ресурси.

Одним із найбільш перспективних підходів до розв'язання цієї задачі є застосування алгоритмів на основі нечіткої логіки та штучного інтелекту, які здатні обробляти великі обсяги неповних, нечітких або суперечливих даних і швидко адаптуватися до змін в оперативній ситуації. Системи, засновані на нечітких наборах правил, дозволяють визначити, чи потрібно застосувати засіб радіомоніторингу на певну частотну ділянку, навіть якщо дані про її активність є неповними чи частковими. Це дає змогу ефективно здійснювати планування і коригування розподілу ресурсів, мінімізуючи ризик пропуску важливих каналів або джерел радіовипромінювання, незважаючи на високий рівень невизначеності.

Штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання та глибинного навчання, можуть аналізувати дані в реальному часі та на основі накопиченого

досвіду прогнозувати ймовірність появи нових каналів зв'язку чи змін в активності існуючих. Вони можуть не лише визначати пріоритети для поточного моніторингу, але й адаптувати стратегію пошуку, спостереження та перерозподілу засобів, враховуючи історичні та оперативні дані.

Комбінування нечіткої логіки дає змогу побудувати інформаційну систему підтримки прийняття рішень, яка допомагає оператору поста радіомоніторингу ухвалювати рішення в реальному часі, надаючи рекомендації на основі аналізу даних, прогнозів та варіативних сценаріїв. [6, 45].

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій системи підтримки прийняття рішень, засновані на методах нечіткої логіки та штучного інтелекту, поступово впроваджуються в різні сфери управління, включаючи безпеку, логістику та автоматизовані системи управління військового призначення. Проте, попри наявність прикладів їх застосування, на сьогодні відсутня підтверджена інформація щодо їх широкомасштабного або цільового використання безпосередньо в задачах добування інформації на постах радіомоніторингу систем супутникового зв'язку.

З урахуванням високого рівня динаміки та складності радіоелектронної обстановки, застосування таких систем у цьому контексті могло б суттєво підвищити рівень обґрунтованості та оперативності прийнятих рішень. Зокрема, це стосується задач розподілу засобів радіомоніторингу за об'єктами, каналами або зонами спостереження. Проте, як показує аналіз існуючих алгоритмів, вони здебільшого орієнтовані на евристичні або ручні методи, які не забезпечують оптимальних значень ключових показників ефективності — таких як ймовірність правильного ухвалення рішення та час, необхідний для його прийняття.

Варто зазначити, що підвищення достовірності рішень вимагає глибшої обробки, верифікації та аналізу більшої кількості вхідних даних, що, у свою чергу, неминуче призводить до збільшення часу, необхідного для їх обробки. Це створює суперечність між вимогою до точності (достовірності) рішень і

потребою в їх оперативності, що особливо критично в умовах реального часу функціонування постів радіомоніторингу ССЗ. Тому розробка нових або адаптація існуючих алгоритмів на основі інтелектуальних підходів має на меті подолання цієї суперечності шляхом автоматизації процесів аналізу, виявлення пріоритетів та прийняття рішень за складних і динамічних умов.

Процес формування рішення щодо розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ є багатокомпонентним та включає послідовність логічно пов'язаних етапів, кожен з яких вимагає певного часу на реалізацію. В умовах обмежених ресурсів та високої динаміки обстановки особливого значення набуває оптимізація саме часових витрат, які впливають на ефективність реагування та достовірність отриманої інформації.

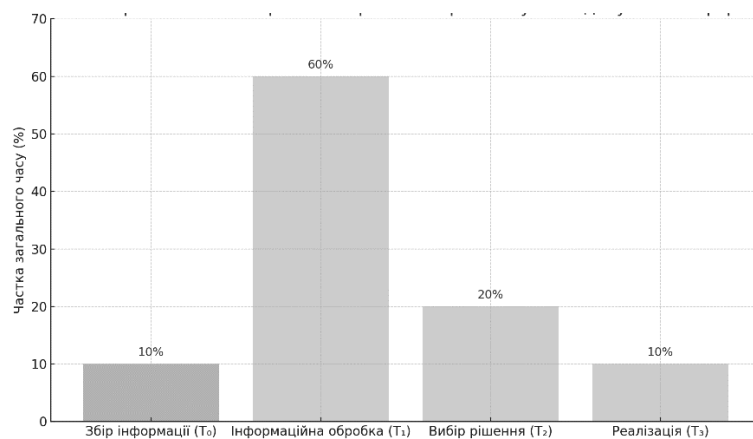


Рисунок - 1.4 Часова діаграма прийняття рішень при веденні радіомоніторингу

У загальному вигляді повний цикл прийняття рішення можна подати у вигляді часової моделі, що включає такі етапи:

$$T_{\text{заг}} = T_0 + T_1 + T_2 + T_3 \quad (1.21)$$

де:

- $T_0$  – збір та реєстрація вхідної інформації, який включає отримання сигналів з радіотехнічних засобів, фіксація активності, початковий аналіз;

- $T_1$  – інформаційна обробка та підтримка прийняття рішень з аналізом параметрів сигналів, визначення можливих джерел, класифікація каналів, формування варіантів розподілу;
- $T_2$  – вибір плану дій, а саме прийняття рішення оператором або автоматизованою системою на основі запропонованих альтернатив;
- $T_3$  – реалізація рішення щодо переналаштування засобів, запуск сценаріїв моніторингу, підтвердження виконання.

Як показано на діаграмі (рис. 1.4), переважна частина загального часу витрачається на обробку вхідної інформації та формування гіпотез щодо можливих рішень. Натомість, безпосередньому вибору рішення приділяється відносно незначний час, що потенційно знижує його обґрунтованість і достовірність. Такий дисбаланс може призводити до прийняття рішень, які не відповідають реальній оперативній обстановці. Крім того, зростаюча кількість можливих варіантів реалізації планів радіомоніторингу ССЗ значно ускладнює процес вибору, збільшуючи когнітивне навантаження на оператора.

Розв'язання задачі підвищення достовірності, своєчасності та точності рішень при плануванні можливе за рахунок автоматизації етапів попередньої обробки даних та формування рекомендацій. Такий підхід дозволяє істотно скоротити тривалість інформаційної підготовки, що, у свою чергу, збільшує доступний час для оператора на ухвалення зваженого рішення. Завдяки цьому з'являється можливість глибшого аналізу ситуації, врахування додаткових параметрів та варіантів, що раніше ігнорувались через часові обмеження. Таким чином, забезпечується підвищення достовірності прийнятого рішення без збільшення загального часу виконання всього алгоритму дій [24].

В рамках даної наукової задачі необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

розробити математичну модель оптимального розподілу технічних засобів радіомоніторингу для здійснення спостереження за каналами систем супутникового зв'язку;

обґрунтувати та реалізувати методику оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку з урахуванням їхніх технічних, функціональних та інформаційних характеристик;

спроектувати архітектуру та створити інформаційну систему підтримки прийняття рішень для планування та розподілу засобів радіомоніторингу;

розробити алгоритми автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу, які засновані на математичних та інтелектуальних підходах (нечітка логіка, критерії ефективності, оптимізація);

провести експериментальне оцінювання ефективності функціонування запропонованої інформаційної системи та підтвердити її переваги в умовах динамічної обстановки.

На основі поставлених задач визначена загальна структурна схема досліджень і взаємозв'язок етапів, що наведено на рис. 1.5.

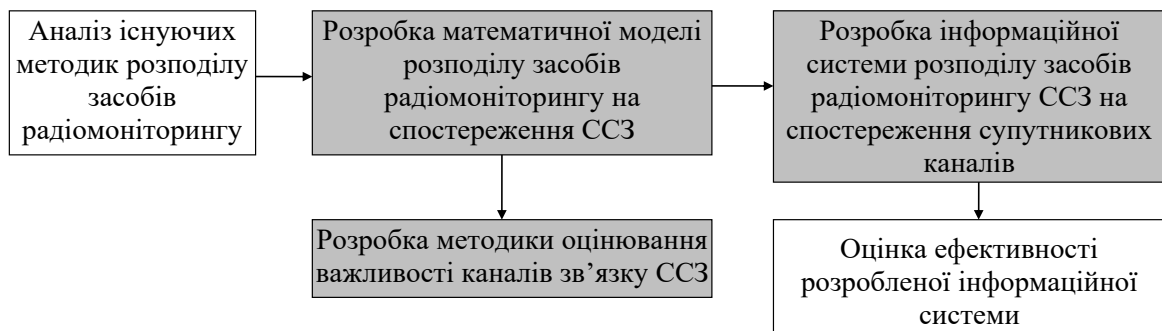


Рисунок 1.5 - Структура досліджень

Виходячи з сутності та змісту добування інформації на постах радіомоніторингу ССЗ до інформаційної системи розподілу засобів висунуто наступні вимоги:

повинна забезпечувати рішення завдання знаходження плану добування інформації в умовах радіоелектронної обстановки, що склалась;

повинна забезпечувати можливість здійснення на її основі автоматизації процедури отримання плану;

ступінь деталізації плану повинен бути до окремого АРМ, з можливістю використання результатів планування при формуванні конкретних завдань на кожний АРМ поста радіомоніторингу ССЗ;

час розподілу засобів на добування інформації на посту не повинен перевищувати визначеного часу, відведеного для планування.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Супутникові системи зв'язку відіграють ключову роль у забезпеченні оперативної, тактичної та стратегічної переваги в сучасних умовах ведення гібридних війн, завдяки своїй глобальній доступності, стійкості до зовнішніх впливів та здатності забезпечувати інтеграцію багатодомених компонентів бойових систем.

2. Розвиток ССЗ відзначається зростанням частотного ресурсу, широким використанням вузькоспеціалізованих діапазонів (С, Х, Кц, Ка тощо), а також переходом до цифрових протоколів зв'язку з використанням сучасних методів модуляції, кодування та шифрування.

2. Системи радіомоніторингу ССЗ в умовах воєнного часу забезпечують не лише контроль за супутниковими каналами, але й виконують критично важливі завдання: виявлення, технічний аналіз, ідентифікація, пеленгування. Існуюча невизначеність стосовно відповідності супутникових каналів супутникам, параметрів їх функціонування, режимів, інтенсивності роботи та інформативності призводить до збільшення часу необхідного для прийняття рішення на застосування засобів радіомоніторингу та зниження достовірності правильного прийняття рішення.

3. Серед основних недоліків наявних підходів до розподілу засобів на пошук і спостереження варто виділити: відсутність методик, що дозволяють здійснювати розподіл ресурсів окремого поста; неможливість оперативного коригування розподілу у відповідь на зміни оперативно-тактичної обстановки; ігнорування низки об'єктивних факторів та умов, що впливають на ефективність функціонування системи; а також відсутність інструментів для автоматизованого управління процесом розподілу.

4. З огляду на обмежені технічні та часові ресурси, раціональний розподіл засобів радіомоніторингу є ключовою умовою досягнення максимальної ефективності. Це вимагає наукового підходу до оптимізації

планування, що може включати методи нечіткої логіки, генетичних алгоритмів та багатокритеріального аналізу.

5. Наукова проблема, що потребує подальшого дослідження, полягає у формуванні комплексного методичного апарату розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, здатного адаптуватись до динамічної обстановки та забезпечувати максимально повне охоплення супутникових каналів зв'язку.

## РОЗДІЛ 2

### ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ НА СПОСТЕРЕЖЕННЯ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Теоретичне обґрунтування вибору математичного апарату для оптимізації процесу розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження систем супутникового зв'язку

У загальному випадку задача оптимального розподілу засобів радіомоніторингу вирішується шляхом застосування методів математичного програмування, що дозволяють формалізувати процес прийняття рішень та знаходити оптимальні або наближено оптимальні рішення. Одним із відомих підходів до розв'язання зазначеної задачі є вибір варіантів розподілу із урахуванням показників важливості джерел радіоелектронної інформації, що дозволяє пріоритезувати об'єкти спостереження відповідно до їх значущості у загальній системі моніторингу [38, 42, 47]. При цьому забезпечується більш ефективно використання обмежених ресурсів за рахунок концентрації зусиль на найбільш важливих каналах або об'єктах. У випадках, коли коефіцієнти відносної важливості каналів визначені заздалегідь або можуть бути оцінені на основі попереднього аналізу, доцільним є використання методів динамічного програмування, які дозволяють побудувати оптимальну стратегію розподілу ресурсів шляхом поетапного вирішення задачі з урахуванням змінних умов і обмежень. Застосування динамічного програмування забезпечує можливість послідовного врахування взаємозв'язків між рішеннями на різних етапах, що є особливо важливим у складних багатокритеріальних задачах розподілу.

В умовах невизначеності та динамічної зміни оперативно-тактичної обстановки отримати точні значення вхідних параметрів задачі розподілу ресурсів часто неможливо. У зв'язку з цим для вирішення таких задач

застосовуюють наближені методи, що базуються на теорії нечіткої логіки та нечітких множин. За цих умов задача розподілу може бути формалізована та розв'язана із використанням інструментарію нечіткого математичного програмування та нечіткого динамічного програмування.

При використанні методу скалярної згортки багатокритеріальна задача розподілу перетворюється на еквівалентну задачу моноцільової оптимізації шляхом агрегування множини нечітких оцінок (таких як важливість джерел радіоелектронної інформації, інформативність каналів зв'язку тощо) в один узагальнений скалярний критерій. Цей підхід дозволяє враховувати різноманітні аспекти ефективності спостереження навіть за умов нечіткої або неповної вхідної інформації.

Особливістю процесу є те, що за наявності надмірної кількості доступних джерел інформації оцінки їх важливості можуть бути штучно завищеними на початкових етапах розподілу ресурсів. Лише зі збільшенням кількості охоплених спостереженням джерел оцінки узгоджуються із їх фактичною інформативністю, що свідчить про необхідність ретельного вибору функцій агрегування та скаляризації.

У випадках високої надмірності інформаційного середовища початкові етапи процедури агрегування за скалярною згортокою можуть мати знижений рівень достовірності через недосконалу оцінку виграшу від окремих джерел. Це потребує особливої уваги до вибору вагових коефіцієнтів і типу функції згортки (наприклад, використання мінімаксного або нечіткого середнього правил).

У сучасних задачах управління ресурсами, зокрема в галузі радіомоніторингу, часто виникає необхідність вибору оптимального рішення з множини альтернатив, кожна з яких оцінюється за кількома критеріями. Такі задачі належать до класу багатокритеріальної оптимізації, де метою є знаходження компромісного рішення за умов наявності множини критеріїв.

Формально, множина альтернатив позначається як  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ . Для кожної альтернативи визначається вектор критеріїв:

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), x \in X, \quad (2.1)$$

де  $f_i(x)$  — значення  $i$ -го критерію.

У багатокритеріальній задачі неможливо одночасно оптимізувати всі критерії через їх суперечливість, тому вводяться поняття домінування та Парето-оптимальності.

Альтернатива  $x_1$  домінує над  $x_2$ , якщо:

$$\forall i, f_i(x_1) \geq f_i(x_2) \text{ і } \exists j: f_j(x_1) > f_j(x_2) \quad (2.2)$$

Парето-оптимальними є альтернативи, які не домінуються жодною іншою альтернативою. Вибір серед Парето-оптимальних рішень вимагає додаткових підходів для ранжування альтернатив.

Одним із найпоширеніших методів переходу від багатокритеріальної до однокритеріальної задачі є метод скалярної згортки, що базується на побудові єдиної цільової функції шляхом агрегування всіх критеріїв.

При цьому необхідно врахувати, що критерії можуть мати різні шкали виміру, тому перед агрегуванням здійснюється нормалізація їх значень.

Основні методи нормалізації:

- мін-макс нормалізація для критеріїв на максимум:

$$\tilde{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (2.3)$$

- Мін-макс нормалізація для критеріїв на мінімум:

$$\tilde{f}_i(x) = \frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (2.4)$$

В результаті нормалізації всі критерії набувають значень у діапазоні  $[0,1]$ .

Кожен критерій має свою вагу  $w_i$ , що визначає його значущість у загальній оцінці, причому:

$$w_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2.5)$$

Визначення вагових коефіцієнтів може здійснюватися за допомогою експертних оцінок, аналітичної ієрархії чи рівномірного розподілу.

Після нормалізації критеріїв і визначення вагових коефіцієнтів формується скалярна функція вигоди:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \tilde{f}_i(x) \quad (2.6)$$

де  $\tilde{f}_i(x)$ — нормалізоване значення  $i$ -го критерію для альтернативи  $x$ .

Оптимальною вважається альтернатива  $x^*$ , для якої скалярна функція набуває максимального значення:

$$F(x^*) = \max F(x), \text{ причому } x \in X \quad (2.7)$$

Функція скалярної згортки має основні властивості такі як: монотонність або збільшення значення будь-якого критерію (при інших незмінних), що покращує загальну оцінку, лінійність, де кожен критерій впливає пропорційно своїй вазі та компаративність, де будь-які дві альтернативи можна порівняти за скалярною функцією.

Альтернативно, в задачах, де потрібна особлива увага до найгірших критеріїв, використовуються інші форми агрегування:

- функція максимуму мінімумів, що орієнтована на вибір альтернативи з найбільш високим мінімальним значенням серед усіх критеріїв:

$$F(x) = \min_i (\tilde{f}_i(x)) \quad (2.8)$$

- геометрична згортка, що краще враховує баланс між критеріями у разі їх сильної залежності:

$$F(x) = \prod_{i=1}^n \tilde{f}_i(x)^{w_i} \quad (2.9)$$

Вибір типу функції згортки залежить від специфіки задачі та стратегічних пріоритетів прийняття рішення.

## 2.2. Математичне моделювання процесу оптимального розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку

Задача розподілу засобів радіомоніторингу між супутниковими каналами зв'язку та відповідними супутниками належить до кола актуальних наукових проблем, що мають важливе прикладне значення в сфері інформаційного моніторингу, управління ресурсами моніторингу та забезпечення ситуаційної обізнаності в умовах складного радіоелектронного середовища.

У наукометричній літературі ця задача досліджується з використанням широкого спектра методів, серед яких можна виокремити такі підходи:

– метод ручного розподілу з реалізацією ітеративного способу послідовного наближення на основі евристичних правил;

- модифіковані схеми послідовного наближення, що враховують змінність вагових коефіцієнтів та критеріїв;
- квазіоптимізаційні евристичні алгоритми, які забезпечують пошук рішень у складному просторі станів без гарантії глобального оптимуму, але з високою обчислювальною ефективністю;
- метод динамічного програмування, що дозволяє реалізовувати поетапне прийняття рішень з урахуванням обмежень ресурсу;
- моделі, побудовані на основі скалярної згортки багатьох критеріїв за нелінійною схемою компромісів, які дозволяють формувати збалансовані рішення з урахуванням пріоритетів, важливості супутників та інформативності каналів.

Попри різноманітність методичних підходів, більшість з них або не забезпечують повної формалізації, або не враховують динамічні фактори та невизначеність, що характерні для сучасних умов застосування систем радіомоніторингу супутникового зв'язку.

Аналіз існуючих способів та методик розподілу показав, що вони мають ряд недоліків, основними з яких є:

неможливість їх застосування в умовах невизначеності інформації щодо параметрів функціонування, режимів, інтенсивності роботи та інформативності супутникових каналів;

детермінований підхід до розв'язання задачі розподілу;

відсутність методики, що забезпечує вирішення комплексного завдання розподілу на спостереження;

складність динамічної зміни розподілу для різних умов радіоелектронної обстановки.

Основним недоліком методологічного апарату розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ є відсутність формалізованої математичної моделі, що дозволяє здійснювати розподіл в умовах невизначеності обстановки.

У системах радіомоніторингу супутникового зв'язку завдання оптимального розподілу засобів перехоплення інформації полягає в

знаходженні такого плану призначення, який забезпечує найкраще покриття супутникових каналів зв'язку з урахуванням важливості об'єктів, технічних можливостей АРМ, пріоритетів супутників та обмежень середовища.

Нехай задано:

- множина АРМ радіоперехоплення:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_K\}, \quad K = |A|,$$

де кожен  $a_K$  — окремий засіб або автоматизоване робоче місце, спроможне вести моніторинг певного супутникового каналу в певний момент часу;

- множина супутників:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}, \quad M = |S|,$$

які здійснюють передачу даних;

- множина супутникових каналів зв'язку:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}, \quad N = |C|,$$

де кожен  $c_j$  — конкретний канал передачі, асоційований з певним супутником  $s_M$ .

Вважаємо, що кожен канал  $c_j$  може бути призначений для моніторингу одним або декількома АРМ  $a_K$ , але кожен АРМ у фіксований момент часу може вести спостереження лише за одним каналом (одночасність виключена або обмежена апаратно).

Введемо функції оцінки ефективності такі, як доступність каналу, інформативність каналу, надійність моніторингу та пріоритет супутника радіомоніторингу.

Доступність каналу  $c_j$  для АРМ  $a_K$  визначимо просторово-часовим фактором:

$$d_{kj} \in \{0,1\}, \quad d_{kj} = 1 \text{ якщо } c_j \text{ доступний для } a_K.$$

Інформативність каналу  $c_j$  матиме вигляд:

$I_j \in [0,1]$ , оцінка важливості або потенційної цінності.

Надійність моніторингу  $R_{kj} \in [0,1]$  — ймовірність безперервного перехоплення сигналу каналом  $c_j$  засобом  $a_k$ .

Пріоритет супутника  $P_m \in [0,1]$  — вагова оцінка значущості супутника  $S_M$ , до якого належить канал  $c_j$ .

Введемо бінарні змінні призначення  $x_{kj}$  та умову:

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо АРМ } a_k \text{ призначено на канал } c_j, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Причому, матимемо ряд обмежень, а саме:

1. Кожен АРМ може бути призначений не більше ніж на один канал:

$$\sum_{j=1}^N x_{kj} \leq 1, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (2.10)$$

2. АРМ може бути призначений лише на доступні канали:

$$x_{kj} \leq d_{kj}, \quad \forall k, j \quad (2.11)$$

3. Кожен канал може бути призначений декільком АРМ (за потреби)  $x_{kj} \in \{0,1\}$ .

Визначимо нормалізовану багатокритеріальну функцію для кожного призначення:

$$\tilde{f}_{kj} = \lambda_1 \cdot I_j + \lambda_2 \cdot R_{kj} + \lambda_3 \cdot P_m, \quad (2.12)$$

де:

- $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$  — вагові коефіцієнти;
- $P_m$  — пріоритет супутника  $S_M$ , для якого  $c_j \in C_m$ .

Вагові коефіцієнти, які визначають вагову функцію, яка відображає ступінь важливості кожного критерію при ухваленні рішення можуть визначатися:

- експертним шляхом (на основі опитування спеціалістів),
- за допомогою методів аналізу ієрархій,
- статистичними методами (наприклад, на основі дисперсійного аналізу),
- автоматично (за історичними даними або оптимізацією стратегічної функції).

Загальна цільова функція системи розподілу засобів радіомоніторингу має вигляд:

$$F(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{kj} \cdot \tilde{f}_{kj} \rightarrow \max, \quad (2.13)$$

враховуючи обмеження.

Отже, задача оптимального призначення АРМ на супутникові канали зв'язку з урахуванням структури супутників та пріоритетів формулюється як задача ціле числового програмування з бінарними змінними та багатокритеріальною згорткою:

$$\max_{x_{kj} \in \{0,1\}} F(X) \text{ за умов: } \begin{cases} \sum_{j=1}^N x_{kj} \leq 1, & \forall k \\ x_{kj} \leq d_{kj}, & \forall k, j \end{cases} \quad (2.14)$$

Для ефективного застосування методу скалярної згортки у задачах оперативного планування розподілу АРМ радіомоніторингу повинні бути забезпечені такі умови:

- наявність достовірних оцінок критеріїв  $I_j, R_{kj}, P_m$ ;
- регулярне оновлення значень  $f_i(x)$  у реальному часі;

- підтримка динамічного перерахунку вагових коефіцієнтів;
- здатність системи підтримки прийняття рішень обчислювати  $F(X)$  в обмежений час планування.

На основі викладеного матеріалу математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на спостереження супутникових каналів передачі даних, з урахуванням їх важливості в умовах невизначеності, можна подати такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{f}_{kj} = \lambda_1 \cdot \tilde{I}_j + \lambda_2 \cdot \tilde{R}_{kj} + \lambda_3 \cdot \tilde{P}_m \text{ де } c_j \in C_m, A_k \in A, \\ F(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{kj} \cdot \tilde{f}_{kj} \rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^N x_{kj} \leq 1, \quad \forall 1, \dots, K \\ x_{kj} \leq d_{kj}, \quad \forall k, j \\ x_{kj} \in \{0,1\}, \quad \forall k, j \end{array} \right. \quad (2.15)$$

де:

- $\tilde{f}_{kj}$  — скалярна функція вигоди для призначення АРМ  $a_k$  на канал  $c_j$ ;
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  — вагові коефіцієнти критеріїв: інформативність  $I_j$ , надійність прийому  $R_k$ , пріоритет супутника  $P_m$ ;
- $x_{kj}$  — бінарна змінна: факт призначення;
- $d_{kj}$  — доступність: можливість технічного призначення АРМ на канал;
- $F(X)$  — загальна функція ефективності розподілу.

У практичних умовах, коли інформація про стан супутникових каналів є неповною, апріорно невизначеною або експертно-оціненою, застосування класичних детермінованих моделей розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ виявляється малоефективним. У таких випадках доцільно використовувати апарат нечіткої логіки, що дозволяє формалізувати знання про об'єкт у вигляді

лінгвістичних змінних та нечітких правил, адаптуючи систему управління до реальної складної обстановки.

У рамках моделі скалярної згортки, кожне потенційне призначення автоматизованого робочого місця на супутниковий канал оцінюється за трьома критеріями:

- інформативність каналу  $I_j$ ,
- надійність прийому сигналу каналом  $R_k$ ,
- пріоритет супутника  $P_m$ , до якого канал належить.

Кожен із цих критеріїв розглядається як нечітка змінна з лінгвістичними оцінками, наприклад:

- для інформативності: (низька, середня, висока);
- для надійності: (нестабільна, помірна, надійна);
- для пріоритету: (незначний, важливий, критичний).

Для кожного терма задається функція належності, яка визначає ступінь відповідності реального значення конкретному лінгвістичному опису.

Нечітке виведення (наприклад, за схемою Мамдані) дозволяє визначити функцію належності для кожного призначення  $a_k \rightarrow c_j$ . Далі застосовується дефазифікація, наприклад методом центру тяжіння:

$$f_{kj}^* = \frac{\int z \cdot \mu_{\text{вигода}_{kj}}(z) dz}{\int \mu_{\text{вигода}_{kj}}(z) dz} \quad (2.16)$$

де  $\mu_{\text{вигода}_{kj}}$  – нечітка функція належності для вигоди призначення  $a_k \rightarrow c_j$ , яка виникає в результаті нечіткого логічного виведення на основі правил типу Мамдані.

Це значення  $f_{kj}^*$  представляє скалярну оцінку вигоди призначення і підставляється в загальну функцію вигоди для всієї системи розподілу:

$$F(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{kj} \cdot f_{kj}^* \rightarrow \max \quad (2.17)$$

З урахуванням викладеного, застосувавши нечітку логіку, отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{kj}^* = \frac{\int z \cdot \mu_{\text{вигода}_{kj}}(z) dz}{\int \mu_{\text{вигода}_{kj}}(z) dz}, \\ F(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{kj} \cdot f_{kj}^* \rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^N x_{kj} \leq 1, \quad \forall 1, \dots, K \\ x_{kj} \leq d_{kj}, \quad \forall k, j \\ x_{kj} \in \{0, 1\}, \quad \forall k, j \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Таким чином, представлена математична модель розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на спостереження супутникових каналів передачі даних, що дозволяє виконувати розподіл з урахуванням важливості каналів передачі даних в умовах невизначеності.

Наукова новизна результату полягає в тому, що удосконалено математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на спостереження супутникових каналів передачі даних, яка базується на застосуванні теорій нечіткої логіки і методу математичного програмування і відрізняється від відомих:

- використанням нечітких лінгвістичних оцінок параметрів об'єктів спостереження, зокрема інформативності каналів, надійності перехоплення сигналів та важливості супутників, що забезпечує врахування експертної інформації та апріорної невизначеності;

- застосуванням методу скалярної згортки для побудови агрегованої функції вигоди з використанням вагових коефіцієнтів, адаптивно визначених

на основі оперативної обстановки, що дозволяє перейти від багатокритеріальної до однокритеріальної задачі оптимізації;

– формуванням нечіткої функції вигоди шляхом логічного виведення за базою продукційних правил типу Мамдані та наступною дефазифікацією, що забезпечує отримання кількісної оцінки ефективності кожного можливого призначення засобів радіомоніторингу;

– інтеграцією побудованої моделі в систему математичного програмування з класичною структурою обмежень, що дає змогу здійснювати розподіл ресурсів у складних оперативно-тактичних умовах із множинними факторами невизначеності.

Практична значимість результату полягає в розвитку науково-методичного апарату забезпечення процесу радіомоніторингу ССЗ.

На основі описаної математичної моделі запропоновано методику розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на спостереження супутникових каналів передачі даних в умовах невизначеності.

2.3. Розробка інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу супутникового зв'язку на основі нечіткого програмування.

Радіомоніторинг систем супутникового зв'язку розглядається як безперервний цілеспрямований процес, що охоплює виявлення та спостереження супутникових каналів передачі даних. Водночас практична реалізація моніторингу усієї сукупності каналів є неможливою через обмеженість наявних засобів радіомоніторингу. Для вирішення цього протиріччя необхідним є раціональний розподіл наявних ресурсів між конкретними завданнями, супутниковими каналами та космічними апаратами.

Аналіз наявних методів і підходів до розподілу засобів показав, що вони характеризуються низкою обмежень, серед яких основним є відсутність формалізованої методики, здатної забезпечити ефективний розподіл у ситуаціях з високим рівнем невизначеності оперативно-тактичної обстановки.

У інформаційній системі розподілу засобів радіомоніторингу кожному супутниковому каналу передачі даних поставлено у відповідність показник відносної важливості, що визначається на основі сукупності критеріїв. Задача розподілу формалізується як задача нечіткого математичного програмування, що забезпечує прийняття обґрунтованих рішень в умовах неповної, нечіткої або лінгвістично описаної інформації.

Завдання розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів передачі даних є багатокритеріальним і ресурсно обмеженим процесом. У реальних умовах функціонування систем супутникового зв'язку вимагається адаптивний підхід, здатний реагувати на зміну обстановки, неповноту інформації та різнотипні обмеження на ресурси.

Інформаційна система розподілу засобів радіомоніторингу призначена для автоматизованого формування плану призначення автоматизованих робочих місць на спостереження супутникових каналів передачі даних в умовах багатокритеріальності, обмежених ресурсів і неповної або нечіткої інформації про обстановку. Методична основа системи — скалярна згортка оцінок, нечітке моделювання та поетапна оптимізація (умовна та безумовна).

На початковому етапі вводяться вхідні дані про множину:

- засобів радіомоніторингу  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ;
- супутникових каналів  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ ;
- супутників  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ .

Причому для кожної пари канал-супутник задаються:

- $I_{ij} \in [0; 1]$  — інформативність каналу;
- $R_{ij} \in [0; 1]$  — надійність прийому сигналу;
- $P_j \in [0; 1]$  — пріоритет супутника;
- $D_{ij} \in \{0, 1\}$  — доступність призначення (1 — можливе, 0 — ні).

Застосовуючи нечітке моделювання кожен параметр представимо у вигляді нечіткої змінної:

- інформативність: (низька, середня, висока);
- надійність: (нестабільна, помірна, надійна);

- пріоритет: (незначний, важливий, критичний).

Наступним кроком для кожного терма формується функція належності  $\mu_l(x)$ , в залежності від значень інтенсивності, надійності та пріоритету. На основі системи правил Мамдані виконується нечітке логічне виведення.

Після цього здійснюємо дефазифікацію методом центру тяжіння:

$$f_{kj}^* = \frac{\int z \cdot \mu_{\text{вигода}_{kj}}(z) dz}{\int \mu_{\text{вигода}_{kj}}(z) dz} \quad (2.19)$$

Для побудови оптимізаційної моделі проведемо умовну та безумовну оптимізацію.

На першому етапі (без обмежень) формується повна матриця вигод:

$$F(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N f_{kj}^*, \quad (2.20)$$

що дозволить попередньо визначити потенційно ефективні призначення незалежно від обмежень.

Умовна оптимізація реалізується з урахуванням:

- технічних обмежень (доступність каналу),
- ресурсних обмежень (один АРМ  $\rightarrow$  один канал),
- бінарності рішень:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{kj} \cdot f_{kj}^* &\rightarrow \max, \\ \sum_{j=1}^N x_{kj} &\leq 1, \quad \forall 1, \dots, K \\ x_{kj} &\leq d_{kj}, \quad \forall k, j \\ x_{kj} &\in \{0,1\}, \quad \forall k, j \end{aligned} \quad (2.21)$$

Система здатна враховувати зміни в реальному часі, при появі нових супутників чи каналів, зміні пріоритетів, виявленні технічної недоступності, оновленні інформаційних критеріїв.

Описану методику представлено у вигляді алгоритму (див. рис. 2.1).

Блок-схема алгоритму побудови раціонального плану спостереження супутникових каналів передачі даних. Схема включає послідовні етапи: введення вхідних даних, побудову функцій належності для показників, обчислення ступеня важливості каналів, нечітке логічне моделювання ситуації, дефазифікацію отриманих оцінок, двоетапну оптимізацію розподілу (спочатку без урахування обмежень, а потім з обмеженнями), прийняття рішення щодо розподілу і формування плану, а також фінальний вивід результатів. Така структуризація алгоритму забезпечує врахування множини критеріїв в умовах невизначеності та обмежених ресурсів, що підвищує ефективність і обґрунтованість прийнятого рішення.

Розглянемо етапи побудови раціонального плану спостереження супутникових каналів передачі даних.

Початковим є введення вхідних даних (інформативність, доступність, технічні можливості). На початковому етапі здійснюється збір і введення всіх необхідних вхідних даних про кожен канал зв'язку. Зокрема, для каналів визначаються показники інформативності (цінність інформації, що передається каналом), доступності (можливість призначення каналу для спостереження, наявність каналу в зоні досяжності) та технічних можливостей (характеристики каналу або обладнання, які впливають на якість і надійність прийому сигналу). Ці параметри слугують критеріями, за якими надалі оцінюватиметься кожен канал у процесі планування. Врахування кількох різнорідних критеріїв дозволяє побудувати модель оцінювання, що відображає як кількісні, так і якісні сторони ефективності використання каналу.

Наступним є побудова функцій належності для кожного показника. На цьому етапі здійснюється фазифікація вхідних даних – перетворення кожного з введених показників (інформативність, доступність, технічні показники

тощо) на нечіткі змінні. Для кожного критерію визначаються лінгвістичні терми (наприклад, інформативність каналу може бути “низька”, “середня” чи “висока”; доступність – “недоступний” чи “доступний”; технічна надійність – “нестабільна”, “помірна”, “надійна” тощо). Відповідно до цих термів конструюються функції належності – криві, що задають ступінь відповідності конкретного числового значення показника до того чи іншого терміну. Побудова адекватних функцій належності є одним з ключових кроків при створенні нечіткої моделі, оскільки саме вона дозволяє формалізувати експертні знання про кожен показник і підготувати дані для нечіткого логічного виведення.

Далі відбувається обчислення ступеня важливості каналів. Після фазифікації (визначення ступенів належності вхідних показників) виконується оцінювання відносної важливості кожного каналу на основі отриманих нечітких оцінок. Іншими словами, агрегуються всі критерії для каналу, щоб отримати інтегральну міру його значущості. Це реалізується через задання правил та формул, які поєднують інформативність, доступність та технічні параметри в єдиний показник важливості каналу. На цьому етапі система на концептуальному рівні визначає, які канали є більш пріоритетними для спостереження, навіть до проведення формальної оптимізації. Отримані значення (поки що нечіткі або проміжні) характеризують важливість каналів і служать вхідними даними для наступного кроку нечіткого моделювання.

При нечіткому логічному виведенні, на основі заданої бази правил, проводиться нечітке логічне виведення, для формального отримання нечіткого висновку щодо важливості або пріоритету кожного каналу. Зокрема, використовується підхід Мамдані – один з найпоширеніших методів прикладної нечіткої логіки. Правила мають вигляд «якщо-то», наприклад: “Якщо інформативність каналу висока *i* надійність прийому висока *i* супутник критично важливий, *то* важливість каналу є високою”. Кожне таке правило оцінюється на основі ступенів належності відповідних вхідних змінних (визначених на етапі 2). На стадії агрегування обчислюється значення

виконання передумови для кожного правила (наприклад, через операції мінімум/максимум для сполучень “і/або”), після чого на стадії активації визначаються нечіткі вихідні значення правил. Далі відбувається акумуляція – об’єднання всіх часткових нечітких висновків правил в одну інтегровану нечітку множину, яка характеризує вихідну змінну “ступінь важливості каналу”. Таким чином, результатом нечіткого виведення є нечітка оцінка важливості кожного каналу, враховуючи всі невизначеності та взаємозв’язки заданих критеріїв.

При дефазифікації значень: отримавши агреговану нечітку оцінку (функцію належності) для важливості каналу в результаті попереднього кроку, алгоритм перетворює її у конкретне числове значення – виконується дефазифікація (приведення до чіткого значення). Іншими словами, розраховується “центр мас” отриманого нечіткого розподілу важливості, що й визначає підсумковий ступінь важливості каналу у вигляді звичайного числа. На цьому етапі для кожного каналу формально отримується інтегральний показник ефективності/пріоритетності, який уже можна використовувати в подальшому для ранжування каналів та постановки задачі оптимального розподілу ресурсів. В результаті дефазифікації зводяться разом різномірні критерії – вихідні значення відображають їхню сукупну оцінку для кожного каналу.

Наступним етапом є: безумовна оптимізація. Використовуючи отримані оцінки важливості каналів, алгоритм переходить до етапу оптимізації розподілу доступних засобів (робочих постів радіомоніторингу) по каналах спостереження. Оптимізація здійснюється у два етапи. Перший етап – безумовна оптимізація, коли тимчасово ігноруються всі обмеження системи. Метою цього кроку є знайти теоретично найкращий розподіл ресурсів на основі одних лише оцінок важливості. Формується повна матриця вигод для всіх можливих призначень каналів на наявні ресурси. Тобто розглядаються всі пари “засіб–канал” і для кожної обчислюється ефективність (корисність) такого призначення, виходячи зі ступеня важливості каналу (отриманого на

попередніх етапах). Це дозволяє попередньо визначити множину потенційно ефективних призначень без урахування жодних обмежень – свого роду ідеальний план розподілу, який максимізує сумарну користь. Іншими словами, безумовна оптимізація визначає, які канали варто призначити до спостереження в першу чергу, якщо б ресурси були необмежені.

Після безумовної оптимізації відбувається умовна оптимізація. На другому етапі – умовної оптимізації – в розгляд вводяться реальні обмеження системи і ресурсів. Алгоритм переглядає результати першого етапу з урахуванням таких факторів: технічні обмеження (наприклад, доступність каналу для конкретного приймача, наявність необхідного обладнання, діапазону частот тощо), ресурсні обмеження (кожен автоматизований робочий місце може одночасно спостерігати лише один канал; кількість постів моніторингу обмежена), а також бінарність рішень (канал або призначається до спостереження, або ні – проміжних значень немає). Умовна оптимізація фактично розв'язує задачу цілочислового програмування: обирається підмножина найважливіших каналів, яка максимально покриває корисність (за результатами безумовної оптимізації) і одночасно не порушує жодне з обмежень. Результатом другого етапу оптимізації є оптимальний розподіл: визначається, які саме канали слід призначити до спостереження кожним доступним постом моніторингу, щоб максимізувати загальну ефективність спостереження і дотриматися всіх обмежень системи.

Після виконання обчислень оптимізації система формує рекомендації щодо оптимального плану спостереження. На цьому етапі здійснюється прийняття рішення – вибір найкращого плану дій. Якщо система працює в автоматичному режимі, рішення приймається автоматизовано на основі розрахованої оптимальної стратегії розподілу каналів. В іншому випадку, саме оператор оцінює запропоновані альтернативи та обирає фінальний план вручну (виходячи з вихідних даних та рекомендацій системи). Таким чином, прийняття рішення завершує процес обчислень: визначено, які канали

спостерігати і якими засобами, у який проміжок часу або з яким пріоритетом. Цей крок фактично затверджує раціональний план, який буде реалізовано.

На основі прийнятого рішення формується безпосередньо раціональний план спостереження. Це може набувати вигляду розкладу або таблиці призначень, де для кожного автоматизованого робочого місця радіомоніторингу вказано, який саме супутниковий канал воно повинно відстежувати (та в який час). План містить усі деталі, необхідні для практичної реалізації: наприклад, номери або частоти каналів, ідентифікатори супутників, відповідні параметри налаштування приймачів, тривалість або періодичність моніторингу кожного каналу тощо. Раціональність плану означає, що ресурси розподілені оптимально – більш інформативні та важливі канали охоплено, водночас жоден наявний ресурс не простоює даремно і не перевантажується. Сформований план готовий до впровадження у роботу системи радіомоніторингу.

На завершальному етапі результати роботи алгоритму виводяться на відповідні пристрої або інтерфейси. Сформований раціональний план спостереження може бути представлений оператору на екран у зручному для аналізу вигляді (наприклад, графік чи список призначень), збережений у базі даних для подальшого використання, а також переданий суміжним підсистемам (для автоматичного налаштування приймачів відповідно до прийнятого плану). Вивід результатів включає також індикатори ефективності або попередження про очікувані наслідки (наприклад, які канали не були покриті через брак ресурсів). Таким чином, алгоритм завершується наданими користувачеві або системі конкретними вказівками для дії. Кінець процесу означає, що план спостереження сформовано; надалі, за потреби, алгоритм може запускатися повторно при зміні умов. Система також передбачає можливість адаптації плану в реальному часі – якщо з'являються нові канали чи супутники, змінюються пріоритети або виявляється недоступність деяких ресурсів, алгоритм може оперативно перерахувати план з урахуванням цих

змін. Це гарантує актуальність і гнучкість планування в динамічному середовищі радіомоніторингу.

Таким чином, у межах розробки ефективної технології управління ресурсами радіомоніторингу систем супутникового зв'язку запропоновано інформаційну систему розподілу засобів на спостереження супутникових каналів передачі даних, яка базується на поєднанні методів скалярної згортки, нечіткої логіки та двоетапної (умовної та безумовної) оптимізації.

Запропонована система враховує реальні обмеження на доступність каналів, технічні можливості засобів спостереження, множинність оцінюваних критеріїв (інформативність, надійність прийому, пріоритетність супутника), а також апіорну невизначеність інформації щодо режимів роботи та якості сигналу. Кожен з критеріїв представлено у вигляді лінгвістичних змінних із відповідними функціями належності, що дозволяє інтерпретувати суб'єктивні та нечіткі оцінки операторів засобів радіомоніторингу.

Математичне ядро реалізовано у вигляді задачі цілочислового програмування, яка формалізує процес прийняття рішень із максимізацією вигоди призначення засобів на конкретні канали. Застосування безумовної оптимізації дозволяє оцінити повний потенціал системи та сформувану область допустимих рішень, у той час як умовна оптимізація враховує всі фактичні обмеження та забезпечує реалістичність призначень.

Наукова новизна полягає в удосконаленні інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, що вперше реалізує адаптивне управління ресурсами на основі:

- використання ступеня важливості каналів передачі даних, представленого у вигляді нечіткої множини;
- інтеграції нечітких висновків до оптимізаційної моделі;
- динамічної адаптації розподілу в умовах змін обстановки та неповної інформації.

На відміну від відомих методів, дана система дозволяє оперативну оновлювати план спостереження у реальному часі, адаптувати його до змін у

доступності каналів або появи нових завдань радіомоніторингу, що значно підвищує гнучкість і ефективність управління визначеними ресурсами.

Результатом застосування є формування обґрунтованого, адаптивного та оптимального плану використання засобів радіомоніторингу ССЗ, що відповідає сучасним вимогам до автоматизованих систем управління в умовах невизначеності та інформаційного перевантаження.

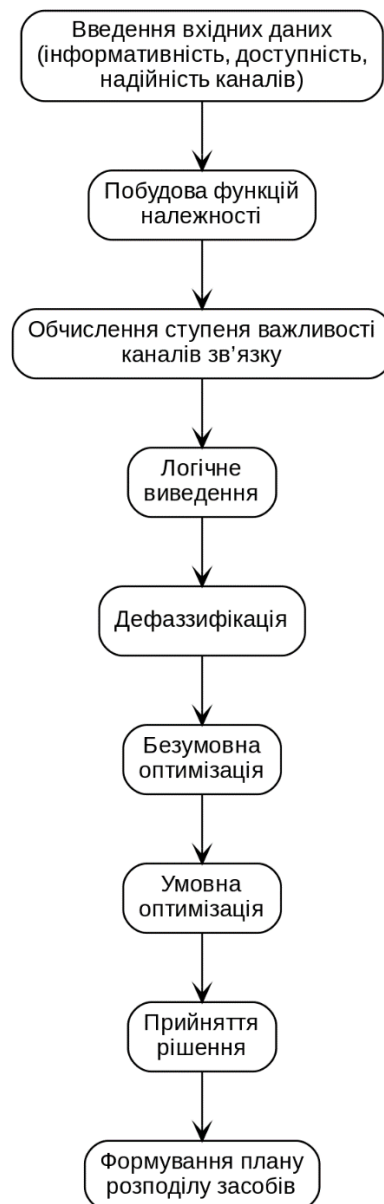


Рисунок - 2.1 Схема побудови раціонального плану спостереження супутникових каналів передачі даних

Практична значимість результату полягає в розвитку науково-методичного апарату забезпечення процесу радіомоніторингу ССЗ.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Обґрунтовано доцільність застосування методу нечіткого математичного програмування для вирішення задачі розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку на спостереження каналів передачі даних. Використання у якості вхідної інформації ступенів важливості каналів, поданих у формі нечітких множин із відповідними функціями належності, дозволяє формалізовано враховувати невизначеність стану та режимів роботи супутникових каналів. Ітераційна природа методу забезпечує адаптивність і гнучкість у змінних умовах інформаційного середовища.

2. Розроблено математичну модель оптимального розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, яка поєднує принципи математичного програмування, скалярної згортки та апарат теорії нечітких множин. Запропонований підхід базується на використанні рекурентних співвідношень і цільової функції, що максимізує ступінь досягнення нечітко заданої мети. Така формалізація дозволяє розглядати задачу розподілу як керований ітераційний процес з багатокритеріальними залежностями.

Наукова новизна цієї моделі полягає у представленні процесу розподілу у вигляді рекурсивного управління з використанням функцій належності в якості динамічних вагових коефіцієнтів. Це забезпечує аналітичну гнучкість системи прийняття рішень в умовах часткової або нечіткої інформації, що принципово відрізняє модель від існуючих класичних підходів.

3. Розроблено інформаційну систему підтримки прийняття рішень щодо розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, яка реалізує запропоновану математичну модель та алгоритмічну методику. Система забезпечує автоматизовану обробку вхідних даних, нечітке оцінювання параметрів каналів, побудову матриці вигод і формування оптимального плану призначення засобів моніторингу. Вона підтримує адаптацію до змін радіоелектронної обстановки та надає інтерфейс візуалізації та ручного коригування розподілу.

Наукова новизна інформаційної системи полягає в тому, що реалізовано механізм раціонального вибору варіанту розподілу на основі нечітких ступенів важливості каналів як критерію прийняття рішення. Це дозволяє підвищити оперативність і точність функціонування системи розподілу в умовах невизначеності, а також підвищити загальну ефективність процесу планування радіомоніторингу ССЗ.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВАЖЛИВОСТІ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

3.1. Методичне обґрунтування системи показників для визначення важливості каналів передачі даних у супутникових системах

Для реалізації розробленої в другому розділі інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку необхідною умовою є урахування значень важливості супутникових каналів передачі даних з метою відбору найбільш інформативних та пріоритетних для спостереження.

При цьому критерієм відбору виступає показник важливості каналу передачі даних, який на сьогодні не має усталеного та загальноприйнятого формального визначення саме для супутникових каналів зв'язку. У наявних підходах здебільшого використовують окремі частинні показники, однак у більшості випадків відсутні чіткі методики їх інтеграції в загальну систему оцінювання. Це обмежує їх ефективність при автоматизованому розподілі засобів радіомоніторингу в динамічному середовищі [9, 16, 27, 37].

Аналіз існуючих методів оцінювання важливості каналів передачі даних виявив низку критичних недоліків, серед яких:

- обмежене застосування методик лише до певних типів каналів;
- відсутність аналітичної моделі, адаптованої до особливостей ССЗ;
- нехтування структурною доступністю як показником оцінки;
- фрагментарний аналіз енергетичної, інформаційної доступності та інформативності, без формування єдиної системи показників;
- недооцінювання впливу середовищних факторів (атмосферні шари, тропосферні та іоносферні неоднорідності) на якість прийому;
- залежність від повної визначеності режимів функціонування каналів;

- висока суб'єктивність в оцінках через домінування людського чинника (досвід та підготовка оператора);
- відсутність уніфікованої методики, що дозволяє адаптувати оцінювання до змін обстановки.

Зазначені обмеження знижують точність і адаптивність оцінювання, що є критичним у контексті сучасних інформаційно операцій.

З огляду на це, постає необхідність у формуванні комплексного, формалізованого та адаптивного підходу до оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку, який:

- враховує структурну, енергетичну та інформаційну доступність;
- дозволяє агрегувати частинні показники за допомогою методів математичного або нечіткого програмування;
- підтримує автоматизовану реалізацію в інформаційних системах;
- забезпечує динамічну зміну оцінок у реальному часі при зміні умов середовища та обстановки, яка склалася.

З урахуванням особливостей функціонування поста радіомоніторингу систем супутникового зв'язку, оцінювання важливості каналів передачі даних повинно здійснюватися в часовому масштабі, максимально наближеному до реального часу.

Показниками важливості каналу для ССЗ можна описати у вигляді функціонала:

$$W_k = F(I_k, A_k, D_k) \quad (3.1)$$

де:

- $W_k$  - інтегральний показник важливості  $k$ -го каналу;
- $I_k$  - інформативність каналу (оцінка очікуваного обсягу/цінності даних);
- $A_k$  - актуальність/пріоритетність для поточного завдання спостереження;
- $D_k$  - доступність (ймовірність надійного прийому сигналу).

У свою чергу, показник доступності  $D_k$  можна визначити за таким функціоналом:

$$D_k = F(I_d, S_d, E_d) \quad (3.2)$$

де  $E_d$ ,  $S_d$ ,  $I_d$  – показники енергетичної, структурної, інформаційної доступності каналу відповідно.

Оцінка енергетичної доступності систем супутникового зв'язку є ключовим аспектом для забезпечення надійного та ефективного зв'язку. Цей процес включає аналіз енергетичного балансу між передавачем і приймачем, враховуючи втрати сигналу під час його поширення через атмосферу та космічний простір.

Енергетичну доступність можна оцінити за допомогою рівняння:

$$E_d = P_r + P_t + G_r + G_t - L_p - L_a - L_s \quad (3.3)$$

де:

- $P_r$  - потужність сигналу на вході приймача (дБм);
- $P_t$  - потужність передавача (дБм);
- $G_t$  - коефіцієнт підсилення передавальної антени (дБі);
- $G_r$  - коефіцієнт підсилення приймальної антени (дБі);
- $L_p$  - втрати на вільному просторі (дБ);
- $L_a$  - атмосферні втрати (дБ);
- $L_s$  - інші системні втрати (дБ).

Втрати на вільному просторі розраховуються за формулою:

$$L_p = 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f + 92,45 \quad (3.4)$$

де:

- $d$  - відстань між передавачем і приймачем (км);

- $f$  - частота сигналу (ГГц).

Кут місця антени станції ( $\varepsilon$ ) є важливим параметром при оцінюванні просторової доступності супутникового зв'язку. Він визначає кут між напрямком на космічний апарат (КА) та площиною місцевого горизонту. Зменшення кута місця призводить до збільшення довжини шляху сигналу через атмосферу, що, в свою чергу, підвищує втрати сигналу.

Для розрахунку відстані, який проходить сигнал в атмосфері використаємо:

$$l = \frac{h}{\sin(\varepsilon)} \quad (3.5)$$

де:

- $l$  - довжина шляху сигналу в атмосфері;
- $h$  - ефективна висота поглинаючого шару атмосфери;
- $\varepsilon$  - кут місця антени.

З формули видно, що при зменшенні кута місця  $\varepsilon$  довжина шляху  $l$  зростає, що призводить до збільшення втрат сигналу в атмосфері. Тому на практиці мінімально допустиме значення кута місця антен земних станцій обмежується величиною близько  $10^\circ$ , а максимальне  $90^\circ$  щоб уникнути надмірних втрат сигналу.

За умови просторової доступності каналу ССЗ енергетично доступними вважаються ті, які забезпечують на вході приймача поста радіомоніторингу, розташованого на відстані  $d$ , рівень сигналу  $P_{vh}$ , що перевищує його реальну чутливість  $P_{por}$ .

$$P_{vh} \geq P_{por} \quad (3.6)$$

Параметрами, які характеризують енергетичну доступність каналів передачі даних ССЗ, є: еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність передавача  $KA P_e$ ; сумарний показник втрат енергії сигналу в радіолінії  $L_e$ ; відношення сигнал/шум на вході приймача  $q$ .

На практиці основним показником, що дозволяє оцінити енергетичну доступність ССЗ є відношення сигнал/шум  $q$ , що визначає можливість виявлення сигналів за наявності шумів з прийнятною ймовірністю похибки. Таким чином, умова енергетично доступного каналу (3.6) буде мати вигляд:

$$q \geq q_{min} \quad (3.7)$$

де  $q_{min}$  – мінімальне значення відношення сигнал/шум, необхідне для забезпечення заданої ймовірності виявлення.

Поглинання радіохвиль в атмосфері визначається наявністю газами тропосфери: киснем та водяними парами. Для кількісної оцінки затухання радіохвиль при їхньому проходженні через атмосферу використовують моделі та формули, які враховують частоту сигналу, відстань поширення та властивості середовища. Однією з базових моделей є розрахунок загасання у вільному просторі, який визначає втрати сигналу без урахування атмосферних впливів.

Загасання у вільному просторі визначається:

$$\theta = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (3.8)$$

де:

- $d$  - відстань між передавачем і приймачем (м);
- $f$  - частота сигналу (Гц);
- $c$  - швидкість світла у вакуумі.

Однак у реальних умовах необхідно враховувати додаткові втрати, спричинені поглинанням сигналу атмосферними газами, такими як кисень і водяна пара. Ці втрати залежать від частоти сигналу, температури, тиску та вологості повітря.

Для розрахунку загасання в атмосфері використаємо:

$$A = \gamma d \quad (3.9)$$

де:

- $A$  - загальне загасання (дБ);
- $\gamma$  - коефіцієнт специфічного загасання (дБ/км), який залежить від частоти сигналу та атмосферних умов;
- $d$  - довжина шляху сигналу через атмосферу (км).

Коефіцієнт специфічного загасання  $\gamma$  визначається за допомогою врахування поглинання радіохвиль атмосферними газами зображеному на графіку.

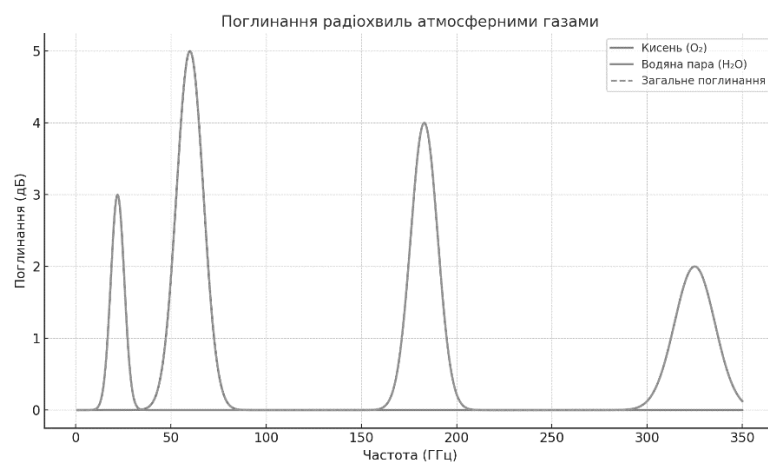


Рисунок 3.1 - Залежність коефіцієнта поглинання енергії радіосигналу для кисню та водяної пари від частоти

Оскільки не можливо точно розрахувати значення втрат енергії сигналу в атмосфері через постійну зміну умов (кількість опадів, хмар, газу) і точно визначити електромагнітну доступність, то їх доцільно розглядати як нечіткі величини. Для оцінювання енергетичної доступності за наявності просторової пропонується ввести неметричний показник – ступінь втрат енергії сигналу в атмосфері ( $X_{vt}$ ) – та визначати його методом експертних оцінок на шкалі якісних термів: дуже низькі втрати (ДНВ), низькі втрати (НВ), середні втрати (СВ), високі втрати (ВВ), дуже високі втрати (ДВВ).

Оцінка структурної доступності  $S_d$ , відображає можливість повноцінного та коректного прийому сигналу супутникового каналу, його демодуляції (декодування) та подальшого аналізу, необхідного для вирішення завдань радіомоніторингу.

Для оцінювання інформаційної доступності пропонується використати показники: доступу до смислової інформації та завантаженість каналу.

Крім того, для оцінки доступності каналу ССЗ необхідно враховувати показник пріоритетності. У складі багатокритеріальної моделі оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку параметр пріоритетність виступає як контекстуальна змінна, що визначає оперативно-тактичну значущість або перевагу використання певного каналу в конкретному сценарії. Під пріоритетністю каналу розуміють експертну або системну оцінку важливості використання каналу зв'язку з погляду оперативних цілей: у контексті актуальних задач радіомоніторингу та згідно з пріоритетністю самих джерел інформації, що забезпечуються каналом. Цей параметр відіграє роль глобального регулятора, який дозволяє підсилювати або зменшувати значення інших показників залежно від обстановки.

Таким чином, функціонал (3.2) можна записати як

$$D_k = F(I_d, S_d, E_d, P_d) \quad (3.10)$$

де  $P_d$  – пріоритетність.

Показник надійності каналу ССЗ характеризує стабільність його функціонування у часі та ймовірність безперервного доступу до інформації в умовах впливу як природних, так і штучних факторів.

Зменшення надійності може бути зумовлене:

змінами параметрів каналу, які є наслідком застосування противником заходів радіоелектронного маскування (зміна частоти, модуляції, кодування тощо);

випадковими техногенними або природними чинниками, наприклад, ушкодженням апаратури каналу внаслідок дії космічного сміття чи впливу сонячної активності.

У класичній теорії надійності основними показниками є: середнє напрацювання на відмову, середній час простою, коефіцієнт готовності каналу, що відображає ймовірність його працездатного стану в довільний момент часу.

Однак, у практичних умовах радіомоніторингу статистичні дані про відмови недоступні, особливо на початковому етапі аналізу. Тому застосування класичних формул є недоцільним.

У межах запропонованої моделі надійність оцінюється опосередковано через показник доступності. Канал вважається надійним у випадку, якщо забезпечується енергетичний прийом, можливість визначення параметрів модуляції та кодування, а також стійкість сигналу протягом часу спостереження.

Оцінка надійності каналу ССЗ характеризує стабільність його функціонування або проявів та інформативності у часі. Поняття надійності розглядається у зв'язку із проведенням заходів оперативного маскування діяльності супутника, що полягає у зміні параметрів каналів передачі даних. Крім того можливе виведення з ладу КА на орбіті в результаті випадкових факторів, наприклад під дією космічного сміття.

Для оцінювання надійності супутникових каналів передачі даних використовують такі основні показники:

середнє напрацювання на відмову – відношення часу роботи каналу до математичного сподівання кількості відмов за цей термін;

середній час простою – математичне очікування випадкового часу вимушеного нерегламентованого перебування каналу в стані непрацездатності;

коефіцієнт готовності – ймовірність того, що канал виявиться працездатним у випадково обраний момент у сталому процесі експлуатації системи. Коефіцієнт готовності показує, яку частку загального часу спостереження канал знаходиться в працездатному стані в сталому процесі експлуатації системи.

Однак для визначення вказаних показників надійності необхідним є отримання статистичних даних про інтенсивність відмов каналу, які не можливо отримати без спостереження та які практично відсутні на етапі пошуку. Тому при оцінюванні важливості каналів передачі даних ССЗ будемо вважати джерело надійним, якщо підтверджена його доступність.

Загальна формула важливості каналу прийматиме вигляд:

$$W_{\text{каналу}} = w_1 \cdot f_1(X_6, X_{11}, X_{12}) + w_2 \cdot f_2(X_1, X_2, X_{10}, X_{13}) + w_3 \cdot f_3(X_3, X_4, X_5) + w_4 \cdot f_4(X_7, X_8, X_9) \quad (3.11)$$

де:

$X_6, X_{11}, X_{12}$  це показники інформативності;

$X_1, X_2, X_{10}, X_{13}$  це показники доступності;

$X_3, X_4, X_5$  це показники надійності;

$X_7, X_8, X_9$  це показники пріоритетності.

Таким чином, використаємо наступні показники оцінювання важливості каналу зв'язку ССЗ:

кут місця антени –  $\gamma (X_1)$ , ступінь втрат енергії сигналу –  $X_{vt} (X_2)$ ;

визначення модуляційних та частотних параметрів  $X_{mch} (X_3)$ ,

визначення параметрів кодування каналу –  $X_{roz} (X_4)$ ;

- ступінь завантаженості каналу –  $X_{zav}$  ( $X_5$ );
- ступінь доступу до смислової інформації –  $X_{dos}$  ( $X_6$ );
- ступінь пріоритетності радіомоніторингу –  $X_{pr}$  ( $X_7$ );
- ступінь цінності каналу зв'язку –  $X_{ck}$  ( $X_8$ );
- ступінь миттєвої (оперативної) цінності каналу зв'язку –  $X_{mck}$  ( $X_9$ );
- енергетична доступність –  $X_{ed}$  ( $X_{10}$ );
- структурна доступність –  $X_{sd}$  ( $X_{11}$ );
- доступність каналу передачі даних –  $X_{dk}$  ( $X_{12}$ );
- ступінь пріоритетності супутника –  $X_{prs}$  ( $X_{13}$ ).

Таким чином, кожному каналу супутникового зв'язку можна поставити у відповідність показник важливості. Однак на даний час відсутній науково-методичний апарат для здійснення цього, тому необхідним є розробка та опис методики оцінювання важливості каналів передачі даних ССЗ.

### 3.2. Розробка методики оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку

У зв'язку з індивідуальним характером змін наведених у підрозділі 3.1 показників та відсутністю кількісних меж їх змін запропоновано для оцінювання важливості каналів ССЗ за обраними показниками використовувати метод нечіткого логічного висновку з теорії нечіткої логіки [10, 28, 43], що полягає у проектуванні та налаштуванні нечіткої бази знань, що являє собою сукупність лінгвістичних висловлювань.

Серед наявних підходів до розв'язання задачі оцінювання важливості супутникових каналів передачі даних було обрано алгоритм нечіткого логічного висновку типу Мамдані. У межах цього методу для встановлення зв'язку між вхідними змінними (значення часткових показників) та вихідною змінною (інтегральною оцінкою важливості) необхідно реалізувати такі етапи: побудувати базу правил (матрицю знань), визначити відповідні функції належності та сформулювати нечіткі логічні залежності.

З урахуванням методу та введених показників  $X_1 - X_{13}$  ступінь важливості (3.1) можна представити у вигляді [10, 28, 43]:

$$W_k = F(X_1, X_2, \dots, X_{13}) \quad (3.12)$$

Для формування матриці знань задаються значення ступеня важливості множиною термів  $W_k \in \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, \}$ :  $W_1$  – канал недоступний (НД);  $W_2$  – низька (Н);  $W_3$  – нижча за середню (НС);  $W_4$  – середня (С);  $W_5$  – вища за середню (ВС);  $W_6$  – висока (В).

Функціонал для формування бази знань подамо у вигляді системи рівнянь з проміжними лінгвістичними змінними:

$$W_k = F(I_k, X_7, X_{13}), \quad (3.13)$$

$$I_k = F(R_k, X_6, X_8, X_9), \quad (3.14)$$

$$R_k = F(D_k, X_3, X_4, X_5), \quad (3.15)$$

$$D_k = F(X_1, X_2, X_{10}, X_{11}, X_{12}). \quad (3.16)$$

3.2.1. Побудова дерева нечіткого логічного висновку та формування бази знань для оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку.

Структура моделі оцінювання важливості каналу ССЗ зображена на рис. 3.2 у вигляді багаторівневого ієрархічного дерева нечіткого логічного висновку.

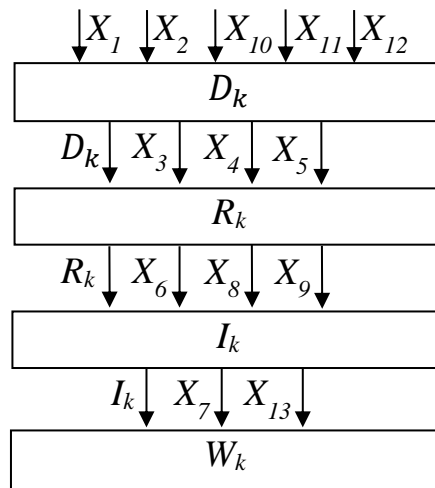


Рисунок 3.2 - Дерево логічного висновку для оцінювання важливості каналів передачі даних ССЗ

Показники розглядаються як лінгвістичні змінні для оцінювання яких застосовується шкала якісних термів (табл. 3.1) [3, 10, 28, 43, 46].

Таблиця 3.1 - Шкала якісних термів

Змінна	Універсальна множина	Терми	Обраний терм	Центр	Бальна оцінка
$X_1$ - кут місця антени	$[0^\circ; 90^\circ]$	НД, ОД, Д, ВП	ОД	45.0	5.0
$X_2$ - ступінь втрат енергії сигналу	$[0; 22]$	ЗПР, ПР, ДР, НР, ЗНР	ДР	2.0	5.0
$X_3$ - визначення модуляційних та частотних параметрів	$[0; 1]$	НВ, ЗВ	ЗВ	0.9	9.0
$X_4$ - визначення параметрів кодування каналу	$[1; 5]$	Н, НС, С, ВС, В	С	3.0	6.5
$X_5$ - ступінь завантаженості каналу	$[1; 5]$	Н, НС, С, ВС, В	ВС	4.0	8.5
$X_6$ - ступінь доступу до смислової інформації	$[0; 1]$	НВ, ВСП	ВСП	0.8	8.0
$X_7$ - пріоритетність задачі	$[1; 5]$	Н, НС, С, ВС, В	В	4.75	9.5
$X_8$ - ступінь цінності каналу зв'язку	$[1; 5]$	Н, НС, С, ВС, В	ВС	4.0	8.5

$X_9$ - ступінь миттєвої (оперативної) цінності каналу зв'язку	[1; 5]	Н, НС, С, ВС, В	С	3.0	6.5
$X_{10}$ - енергетична доступність	[0; 5]	НД, Н, НС, С, ВС, В	В	4.75	9.5
$X_{11}$ - структурна доступність	[1; 5]	НД, Н, С, В	С	3.0	6.5
$X_{12}$ - доступність передачі даних	[1; 5]	НД, Н, С, В	В	4.75	9.5
$X_{13}$ - ступінь пріоритетності супутника	[1; 5]	Н, НС, С, ВС, В	С	3.0	6.5

Позначення скорочень термів: НД – недоступно, ОД – обмежено доступно, Д – доступно, ВП – впевнене приймання, ЗПР – значно перевищує резерв, ПР – перевищує резерв, ДР – дорівнює резерву, НР – нижче резерву, ЗНР – значно нижче резерву, НВ – не визначено, ЗВ – значно визначено, Н – низький, НС – нижче середнього, С – середній, ВС – вище середнього, В – високий, ВСП – визначено стек протоколів.

Користуючись введеними термами та знаннями групи експертів, співвідношення подають у вигляді таблиць (див. додаток Б).

Оцінювання важливості каналу передачі даних системи супутникового зв'язку за умов апіорної невизначеності ґрунтується на поєднанні методів нечіткого моделювання, аналізу ієрархій та бальних оцінок. З цією метою формується нечітке логічне рівняння, що забезпечує узагальнення часткових оцінок у вигляді скалярної згортки:

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_i(x_i), \quad (3.17)$$

де:

- $W$  – інтегральна оцінка важливості каналу;
- $n$  – кількість показників оцінювання;

- $x_i$  – значення  $i$ -тої змінної, представлене у вигляді лінгвістичного терму;
- $w_i \in [0; 1]$ ,  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  – вагові коефіцієнти, визначені методом аналізу ієрархій Сааті;
- $\mu_i(x_i) \in [0; 10]$  – числова бальна оцінка (центр функції належності) терму, що відповідає значенню змінної  $x_i$ .

Процедура побудови рівняння включає кілька етапів. Спочатку за методом Сааті здійснюється парне порівняння змінних для отримання матриці узгодженості та обчислення ваг  $w_i$ . Далі, для кожної змінної  $x_i$  формується універсальна множина  $U_i$  і лінгвістична шкала якісних термів, наприклад: низький (Н), нижче середнього (НС), середній (С), вище середнього (ВС), високий (В).

Кожному терму  $T_{ij}$  ставиться у відповідність функція належності  $\mu_{ij}(x)$ , яка відображає ступінь відповідності значення змінної терму. У випадку нечіткої логіки ці функції мають вигляд симетричних трикутних або трапецієподібних, а бальна оцінка  $\mu_i(x_i)$  приймається за центр терму або середнє значення його плато.

Таким чином, формула скалярної згортки (агрегування) забезпечує обчислення інтегральної важливості через ваги Сааті та функції належності, визначені методом бальних оцінок. Такий підхід дозволяє об'єднати формалізоване експертне знання з нечіткими уявленнями про значення змінних.

Для переходу до класичного нечіткого виводу типу Мамдані, можливе використання імплікаційного рівняння на основі *min* – *max*-композиції:

$$W = \max_k \left( \min_{i \in I_k} \mu_i(x_i) \right) \quad (3.18)$$

Проте для цілей аналітичного оцінювання використовується адитивна модель зваженої суми, як така, що є більш інтерпретованою та зручною для практичного впровадження в інформаційних системах підтримки прийняття рішень.

Таким чином, для обчислення інтегральної оцінки важливості каналу зв'язку достатньо мати функції належності змінних до відповідних лінгвістичних термів, які дозволяють визначити бальні значення часткових показників. Вагові коефіцієнти змінних, що отримані методом Сааті, використовуються в подальшому для зваженого агрегування цих оцінок у складі нечіткого логічного рівняння.

Таким чином, для реалізації розрахункової моделі оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку необхідно сформулювати функції належності вхідних змінних до відповідних лінгвістичних термів. Це забезпечує можливість перетворення якісної експертної інформації в кількісну бальну оцінку, яка використовується у формулі нечіткого логічного рівняння із вагами, визначеними методом Сааті.

Для побудови функцій належності застосовуються як прямі, так і непрямі методи:

- прямі методи: табличне завдання, графічне моделювання, аналітичне завдання функцій, метод семантичних диференціалів, експертне призначення ступенів належності.

- непрямі методи: метод парних порівнянь, статистичні дані, точкові та інтервальні оцінки, параметричні підходи, метод найменших квадратів, метод рангових оцінок.

Зважаючи на значну залежність результатів прямих методів від суб'єктивного досвіду експертів, їх використання у рамках даної моделі є недоцільним. Натомість, непрямі методи, попри більшу трудомісткість, забезпечують кращу стабільність та об'єктивність результатів. Серед них доцільно виділити метод рангових оцінок, який є простим у реалізації та не вимагає статистичних даних або вирішення характеристичних рівнянь. Метод

дозволяє побудувати функції належності на основі експертного впорядкування термів за важливістю, що узгоджується з прийомами обґрунтування значень у методі бальних оцінок.

У зв'язку з цим для задачі оцінювання важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку доцільним є використання методу рангових оцінок як основного підходу до побудови функцій належності у рамках комбінованої моделі Сааті – бальні оцінки.

При розрахунку функцій належності для кожної лінгвістичної змінної в рамках методу бальних оцінок спочатку задається універсальна множина значень  $U_i$ , на якій визначено лінгвістичну змінну  $X_i$ , а також сукупність нечітких термів  $T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, T_{i4}, \dots, T_{im}$ , що використовуються для її якісного оцінювання.

Далі, для кожного набору термів формується матриця відносних оцінок рангів  $R = [r_{ij}]$ , яка відображає експертне впорядкування термів за ступенем вираженості ознаки. Елемент матриці  $r_{ij}$  визначається за правилом:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } T_i > T_j \\ 0,5 \text{ якщо } T_i = T_j \\ 0, \text{ якщо } T_i < T_j \end{cases} \quad (3.19)$$

На основі цієї матриці обчислюється середнє значення кожного терму, що інтерпретується як центр функції належності або бальна оцінка терму:

$$\mu(T_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{ij} \cdot S, \quad (3.20)$$

де  $S$  — масштаб нормування.

Отримані значення  $\mu(T_i)$  використовуються у методі бальних оцінок як числові еквіваленти лінгвістичних термів та підставляються у підсумкове

нечітке логічне рівняння, що агрегує часткові оцінки із вагами, отриманими за методом Сааті.

Таким чином, для кожного терму, що входить до складу лінгвістичної змінної, формується відповідна функція належності на заданій універсальній множині. Побудовані дискретні значення функцій нормуються шляхом ділення на максимальне з них, що дозволяє уніфікувати шкалу до діапазону  $[0;1]$ .

Однак отримані графічні побудови мають лише таблично-дискретну природу і не дають змоги визначати значення функцій належності для довільних (несталонних) значень змінних через відсутність їх аналітичного подання. З цією метою за побудованими графіками виконується підбір відповідного виду апроксимуючої функції та її параметрів таким чином, щоб отриманий вираз максимально точно описував емпіричні дані.

Аналіз типових функцій належності, які можуть бути використані для апроксимації даних, отриманих у результаті попереднього оцінювання (зокрема на основі бальних значень), дозволяє обґрунтовано обрати такі функціональні форми:

– П-подібні функції належності (дзвоноподібні), що дозволяють описати симетричні терми центрального типу, задаються виразом:

$$\mu(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-c}{a}\right)^{2b}\right) \quad (3.21)$$

де:

$c$  — координата максимуму (центр терму),

$a$  — параметр ширини функції,

$b$  — коефіцієнт стиснення функції належності.

З проведеного аналізу основних типів функції належності для апроксимації даних обрані наступні:

– S-подібні та Z-подібні функції належності застосовуються для крайових термів, що характеризуються асиметричними характеристиками з поступовим наростанням або спаданням значень. Ці функції описуються такими виразами:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-c}{a}\right)^2\right) & \text{для Z – подібної функції} \\ \exp\left(-\left(\frac{x-c}{a}\right)^2\right) & \text{для S – подібної функції} \end{cases} \quad (3.22)$$

де:

- $c$  — параметр зсуву, що визначає початок зміни функції;
- $a$  — параметр масштабу (ширини переходу).

Щоб отримати параметри функцій  $a, b, c$ , які забезпечують найкращу відповідність апроксимації до емпіричних даних (отриманих методом бальних оцінок), використовується метод найменших квадратів. При цьому мінімізується функція відхилення:

$$J(a, b, c) = \sum_{k=1}^n \left( \mu_k^{\text{бальна}} - \mu_k^{\text{модель}}(x_k; a, b, c) \right)^2 \quad (3.23)$$

Мінімум функції досягається у точці, де всі частинні похідні від функції  $J$  дорівнюють нулю:

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \frac{\partial J}{\partial b} = \frac{\partial J}{\partial c} = 0 \quad (3.24)$$

Точність отриманого результату можливо перевірити розрахувавши середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\mu_k^{\text{бальна}} - \mu_k^{\text{модель}})^2} \quad (3.25)$$

Таким чином визначаються функції належності нечітким термам вхідних показників важливості каналів ССЗ.

3.2.2. Побудова функцій належності нечітким термам показників оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку

Показник кут місця антени комплексу радіомоніторингу ССЗ визначений на універсальній множині 0–90 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Розрахуємо функції належності елементів універсальної множини терму “недоступно” для різних значень кута місця антени:

$$\mu^{\text{нд}}(0) = \exp\left(-\left(\frac{0-10}{8}\right)^4\right) = \exp(-(1.25)^4) = \exp(-2.4414) \approx 0.087,$$

$$\mu^{\text{нд}}(10) = \exp\left(-\left(\frac{10-10}{8}\right)^4\right) = \exp(-(0)^4) = 1,$$

$$\mu^{\text{нд}}(20) = \exp\left(-\left(\frac{20-10}{8}\right)^4\right) = \exp(-(1.25)^4) = \exp(-2.4414) \approx 0.087,$$

$$\mu^{\text{нд}}(30) = \exp\left(-\left(\frac{30-10}{8}\right)^4\right) = \exp(-(2.5)^4) = \exp(-39.06) \approx 0,$$

$$\mu^{\text{нд}}(60) = \exp\left(-\left(\frac{60-10}{8}\right)^4\right) \approx 0,$$

$$\mu^{\text{нд}}(90) = \exp\left(-\left(\frac{90-10}{8}\right)^4\right) \approx 0.$$

Аналогічно розраховуємо функції належності елементів універсальної множини терму “обмежена доступність” для різних значень кута місця антени:

$$\mu^{од}(0) = \exp\left(-\left(\frac{0-30}{10}\right)^4\right) = \exp(-(-3)^4) = \exp(-81) \approx 0,$$

$$\mu^{од}(10) = \exp\left(-\left(\frac{10-30}{10}\right)^4\right) = \exp(-(-2)^4) = \exp(-16) \approx 0,$$

$$\mu^{од}(30) = \exp\left(-\left(\frac{30-30}{10}\right)^4\right) = \exp(-(0)^4) = 1,$$

$$\mu^{од}(45) = \exp\left(-\left(\frac{45-30}{10}\right)^4\right) = \exp(-(1,5)^4) = \exp(-5,0625) \approx 0,0063,$$

$$\mu^{од}(60) = \exp\left(-\left(\frac{60-30}{10}\right)^4\right) = \exp(-(3)^4) = \exp(-81) \approx 0,$$

$$\mu^{од}(90) = \exp\left(-\left(\frac{90-30}{10}\right)^4\right) = \exp(-(6)^4) = \exp(-1296) \approx 0.$$

Розраховуємо функції належності елементів універсальної множини терму “доступний” для різних значень кута місця антени:

$$\mu^д(0) = \exp\left(-\left(\frac{0-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(-5)^4) = \exp(-625) \approx 0,$$

$$\mu^д(10) = \exp\left(-\left(\frac{10-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(-4,167)^4) = \exp(-301,5) \approx 0,$$

$$\mu^д(30) = \exp\left(-\left(\frac{30-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(-2,5)^4) \approx 0,$$

$$\mu^д(45) = \exp\left(-\left(\frac{45-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(1,25)^4) = \exp(-2,441) \approx 0,0870,$$

$$\mu^д(60) = \exp\left(-\left(\frac{60-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(0)^4) = 1,$$

$$\mu^д(75) = \exp\left(-\left(\frac{75-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(1,25)^4) = \exp(-2,441) \approx 0,0870.$$

$$\mu^д(90) = \exp\left(-\left(\frac{90-60}{12}\right)^4\right) = \exp(-(2,5)^4) = \exp(-39,06) \approx 0.$$

Розраховуємо функції належності елементів універсальної множини терму «впевнений прийом» для різних значень кута місця антени:

$$\mu^{вп}(0) = \exp\left(-\left(\frac{0-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(-11,25)^4) = \exp(-16029,78) \approx 0,$$

$$\mu^{вп}(10) = \exp\left(-\left(\frac{10-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(-10)^4) = \exp(-10000) \approx 0,$$

$$\begin{aligned}\mu^{\text{ВП}}(30) &= \exp\left(-\left(\frac{30-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(-7.5)^4) = \exp(-3164.06) \approx 0, \\ \mu^{\text{ВП}}(45) &= \exp\left(-\left(\frac{45-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(-5.625)^4) = \exp(-1000.63) \approx 0, \\ \mu^{\text{ВП}}(60) &= \exp\left(-\left(\frac{60-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(-3.75)^4) = \exp(-197.75) \approx 0, \\ \mu^{\text{ВП}}(75) &= \exp\left(-\left(\frac{75-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(-1.875)^4) = \exp(-12.4) \approx 0,000004, \\ \mu^{\text{ВП}}(90) &= \exp\left(-\left(\frac{90-90}{8}\right)^4\right) = \exp(-(0)^4) = 1.\end{aligned}$$

Коефіцієнти  $a, b, c$  для обрахунку функцій належності були взяті відповідно експертно-обґрунтованих значень, які відповідають розташуванню та ширині кожного терму, згідно з логікою:

Таблиця 3.2 - Значення термів та коефіцієнтів  $a, b, c$

Терм	Центр $c$	Ширина $a$	Кривизна $b$	Обґрунтування
НД	10	8	2	Сигнал приймається під малим кутом; терм вузький
ОД	30	10	2	Зона з середнім рівнем прийому
Д	60	12	2	Більша ширина як зона стабільного прийому
ВП	90	8	2	Дуже високий кут, прийом майже гарантований

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.3.

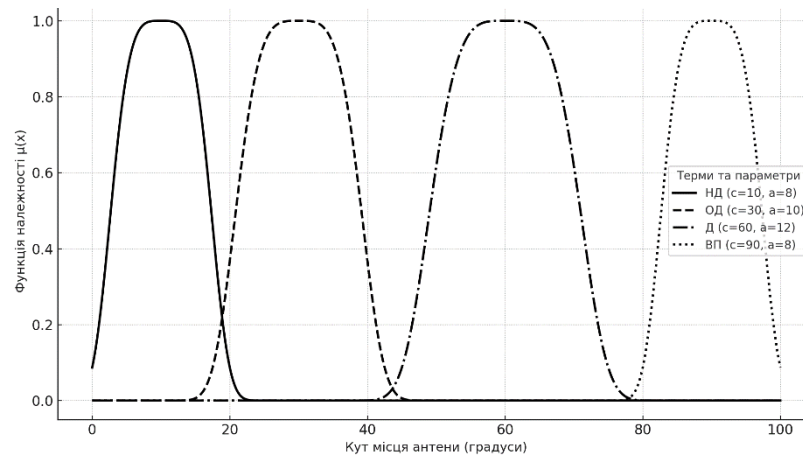


Рисунок 3.3 - Графічне зображення функції належності показника  $X_1$

Аналогічно будемо функції належності інших показників.

Показник  $X_2$  – ступінь втрат енергії сигналу визначений на універсальній множині 0–4 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.3 - Функції належності для змінної  $X_2$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
НД	0.0	0.9394	Д	0.0	0.0
НД	0.1	1.0	Д	0.1	0.0
НД	0.2	0.9394	Д	0.2	0.0
НД	0.3	0.3679	Д	0.3	0.0
НД	0.4	0.0063	Д	0.4	0.0
НД	0.5	0.0	Д	0.5	0.0
НД	0.6	0.0	Д	0.6	0.0063
НД	0.7	0.0	Д	0.7	0.3679
НД	0.8	0.0	Д	0.8	0.9394
НД	0.9	0.0	Д	0.9	1.0
НД	1.0	0.0	Д	1.0	0.9394

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.4.

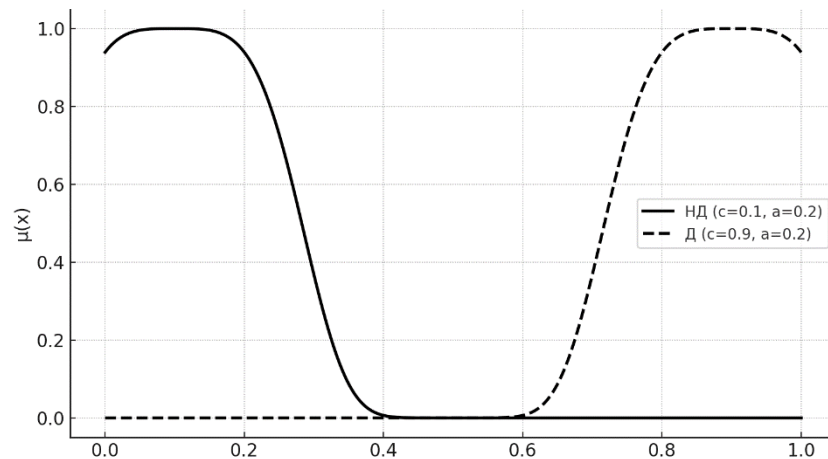


Рисунок 3.4 - Графічне зображення функції належності показника  $X_2$

Показник  $X_3$ — ступінь розкриття виду модуляції та частоти каналу, визначений на універсальній множині 0–1 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.4 - Функції належності для змінної  $X_3$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
НВ	0.0	0.3679	ЗВ	0.0	0.0
НВ	0.1	0.9394	ЗВ	0.1	0.0
НВ	0.2	1.0	ЗВ	0.2	0.0
НВ	0.3	0.9394	ЗВ	0.3	0.0
НВ	0.4	0.3679	ЗВ	0.4	0.0
НВ	0.5	0.0063	ЗВ	0.5	0.0
НВ	0.6	0.0	ЗВ	0.6	0.0063
НВ	0.7	0.0	ЗВ	0.7	0.3679
НВ	0.8	0.0	ЗВ	0.8	0.9394
НВ	0.9	0.0	ЗВ	0.9	1.0
НВ	1.0	0.0	ЗВ	1.0	0.9394

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.5.

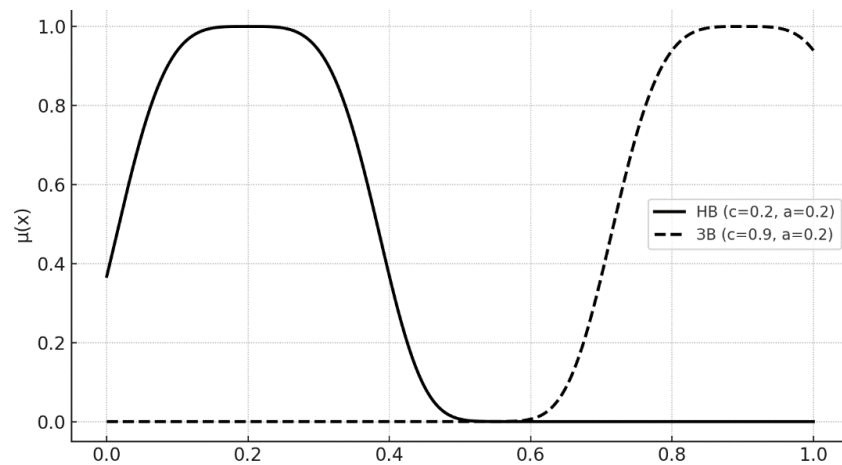


Рисунок 3.5 - Графічне зображення функції належності показника  $X_3$

Показник  $X_4$  – визначення параметрів кодування каналу визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.5 - Функції належності для змінної  $X_4$

<i>Терм</i>	$x$	$\mu(x)$	<i>Терм</i>	$x$	$\mu(x)$
Н	1	1.0	С	4	0.0004
Н	2	0.0004	С	5	0.0
Н	3	0.0	ВС	1	0.0
Н	4	0.0	ВС	2	0.0
Н	5	0.0	ВС	3	0.0004
НС	1	0.0004	ВС	4	1.0
НС	2	1.0	ВС	5	0.0004
НС	3	0.0004	В	1	0.0
НС	4	0.0	В	2	0.0
НС	5	0.0	В	3	0.0
С	1	0.0	В	4	0.0004
С	2	0.0004	В	5	1.0
С	3	1.0			

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.6.

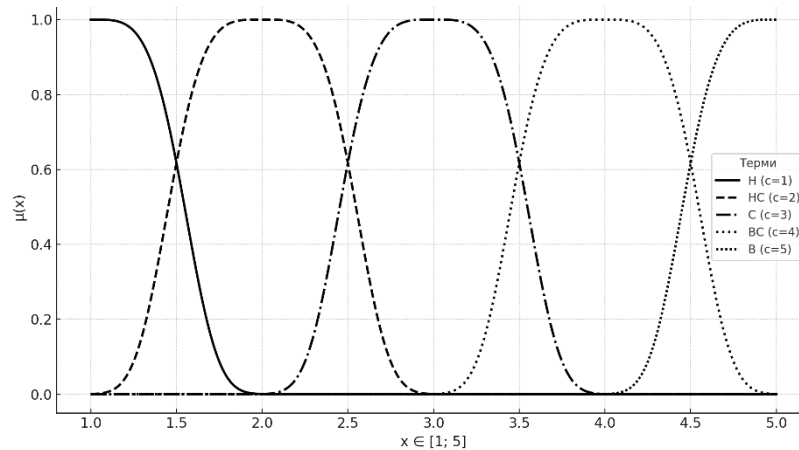


Рисунок 3.6 - Графічне зображення функції належності показника  $X_4$

Показник  $X_5$  – ступінь завантаженості каналу на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.6 - Функції належності для змінної  $X_5$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
Н	1	1.0	С	4	0.0004
Н	2	0.0004	С	5	0.0
Н	3	0.0	ВС	1	0.0
Н	4	0.0	ВС	2	0.0
Н	5	0.0	ВС	3	0.0004
НС	1	0.0004	ВС	4	1.0
НС	2	1.0	ВС	5	0.0004
НС	3	0.0004	В	1	0.0
НС	4	0.0	В	2	0.0
НС	5	0.0	В	3	0.0
С	1	0.0	В	4	0.0004
С	2	0.0004	В	5	1.0
С	3	1.0			

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.7.

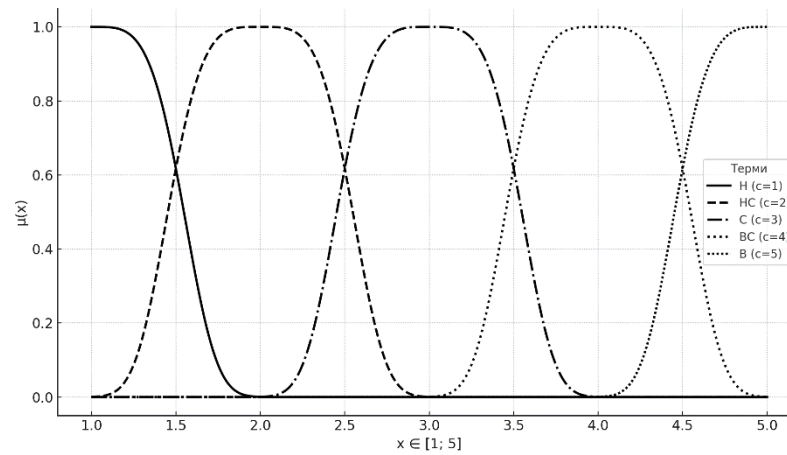


Рисунок 3.7 - Графічне зображення функції належності показника  $X_5$ .

Показник  $X_6$  – ступінь доступу до смислової інформації визначений на універсальній множині 0–1 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.7 - Функції належності для змінної  $X_6$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
НВ	0.0	0.3679	ВСП	0.0	0.0
НВ	0.1	0.9394	ВСП	0.1	0.0
НВ	0.2	1.0	ВСП	0.2	0.0
НВ	0.3	0.9394	ВСП	0.3	0.0
НВ	0.4	0.3679	ВСП	0.4	0.0
НВ	0.5	0.0063	ВСП	0.5	0.0063
НВ	0.6	0.0	ВСП	0.6	0.3679
НВ	0.7	0.0	ВСП	0.7	0.9394
НВ	0.8	0.0	ВСП	0.8	1.0
НВ	0.9	0.0	ВСП	0.9	0.9394
НВ	1.0	0.0	ВСП	1.0	0.3679

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.8.

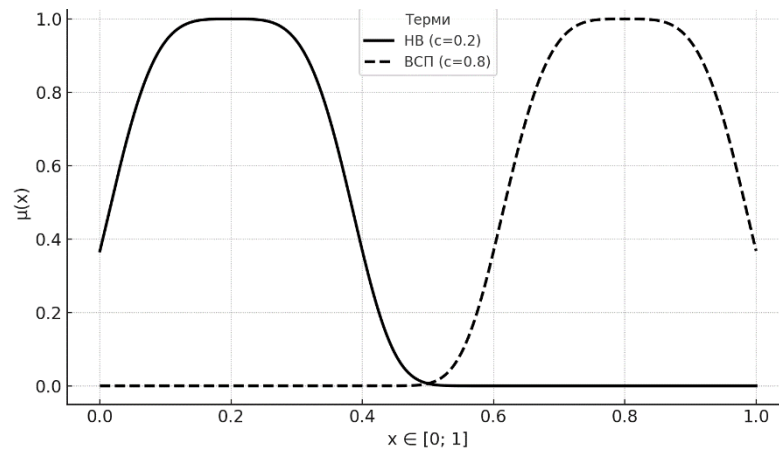


Рисунок 3.8 - Графічне зображення функції належності показника  $X_6$

Показник  $X_7$  – пріоритетність задачі радіомоніторингу визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.8 - Функції належності для змінної  $X_7$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
Н	1	1.0	С	4	0.0004
Н	2	0.0004	С	5	0.0
Н	3	0.0	ВС	1	0.0
Н	4	0.0	ВС	2	0.0
Н	5	0.0	ВС	3	0.0004
НС	1	0.0004	ВС	4	1.0
НС	2	1.0	ВС	5	0.0004
НС	3	0.0004	В	1	0.0
НС	4	0.0	В	2	0.0
НС	5	0.0	В	3	0.0
С	1	0.0	В	4	0.0004
С	2	0.0004	В	5	1.0

С	3	1.0			
---	---	-----	--	--	--

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.9.

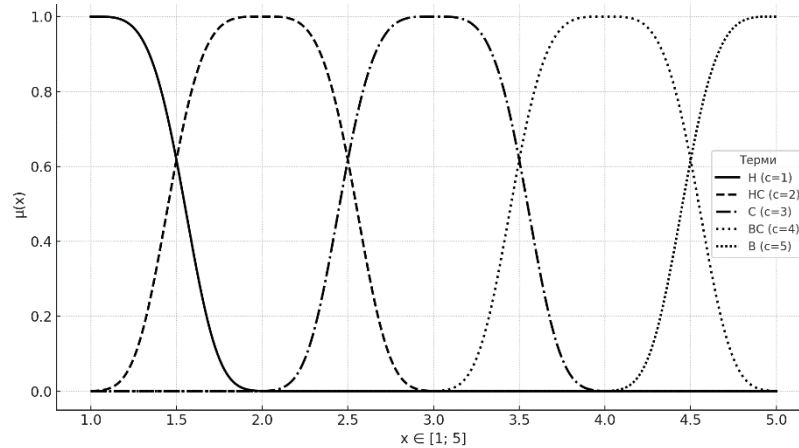


Рисунок 3.9 - Графічне зображення функції належності показника  $X_7$

Показник  $X_8$  – ступінь цінності каналу зв'язку визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.9 - Функції належності для змінної  $X_8$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
Н	1	1.0	С	4	0.0004
Н	2	0.0004	С	5	0.0
Н	3	0.0	ВС	1	0.0
Н	4	0.0	ВС	2	0.0
Н	5	0.0	ВС	3	0.0004
НС	1	0.0004	ВС	4	1.0
НС	2	1.0	ВС	5	0.0004
НС	3	0.0004	В	1	0.0
НС	4	0.0	В	2	0.0
НС	5	0.0	В	3	0.0

С	1	0.0	В	4	0.0004
С	2	0.0004	В	5	1.0
С	3	1.0			

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.10.

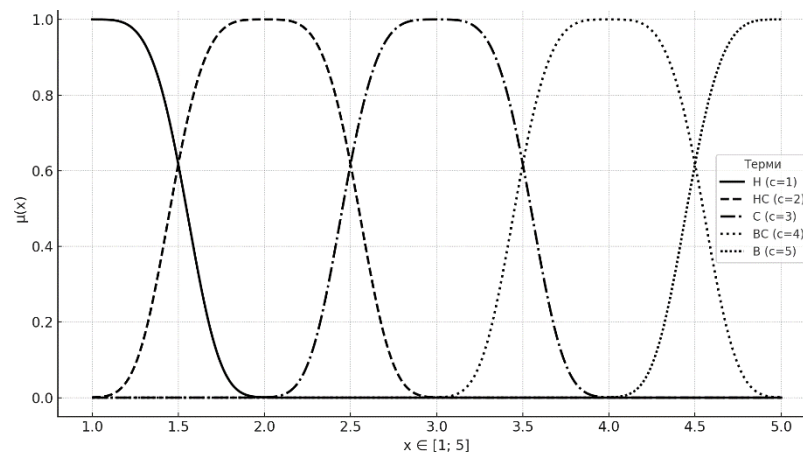


Рисунок 3.10 - Графічне зображення функції належності показника  $X_8$ .

Показник  $X_9$  – ступінь миттєвої (оперативної) цінності каналу зв'язку визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.10 - Функції належності для змінної  $X_9$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
Н	1	1.0	С	4	0.0004
Н	2	0.0004	С	5	0.0
Н	3	0.0	ВС	1	0.0
Н	4	0.0	ВС	2	0.0
Н	5	0.0	ВС	3	0.0004
НС	1	0.0004	ВС	4	1.0
НС	2	1.0	ВС	5	0.0004
НС	3	0.0004	В	1	0.0

НС	4	0.0	В	2	0.0
НС	5	0.0	В	3	0.0
С	1	0.0	В	4	0.0004
С	2	0.0004	В	5	1.0
С	3	1.0			

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.11.

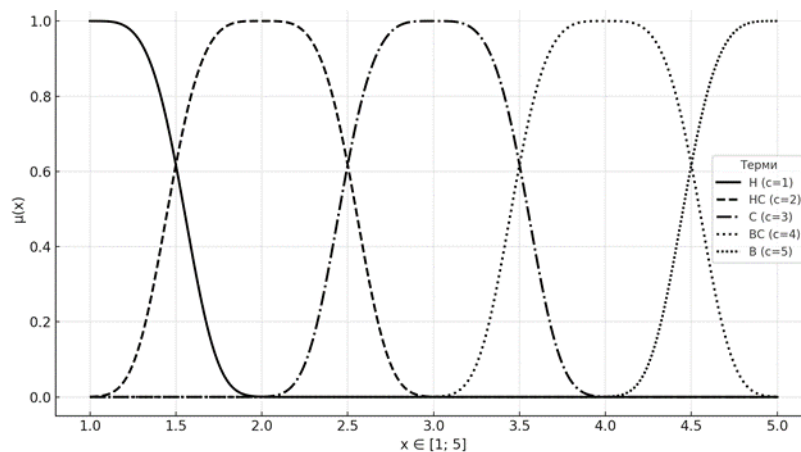


Рисунок 3.11 - Графічне зображення функції належності показника  $X_9$

Показник  $X_{10}$  – енергетична доступність каналу зв'язку визначений на універсальній множині 0–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.11 - Функції належності для змінної  $X_{10}$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
НД	0	1.0	С	3	1.0
НД	1	0.0004	С	4	0.0004
НД	2	0.0	С	5	0.0
НД	3	0.0	ВС	0	0.0
НД	4	0.0	ВС	1	0.0
НД	5	0.0	ВС	2	0.0
Н	0	0.0004	ВС	3	0.0004

Н	1	1.0	BC	4	1.0
Н	2	0.0004	BC	5	0.0004
Н	3	0.0	B	0	0.0
Н	4	0.0	B	1	0.0
Н	5	0.0	B	2	0.0
НС	0	0.0	B	3	0.0
НС	1	0.0004	B	4	0.0004
НС	2	1.0	B	5	1.0
НС	3	0.0004	C	0	0.0
НС	4	0.0	C	1	0.0
НС	5	0.0	C	2	0.0004

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.12.

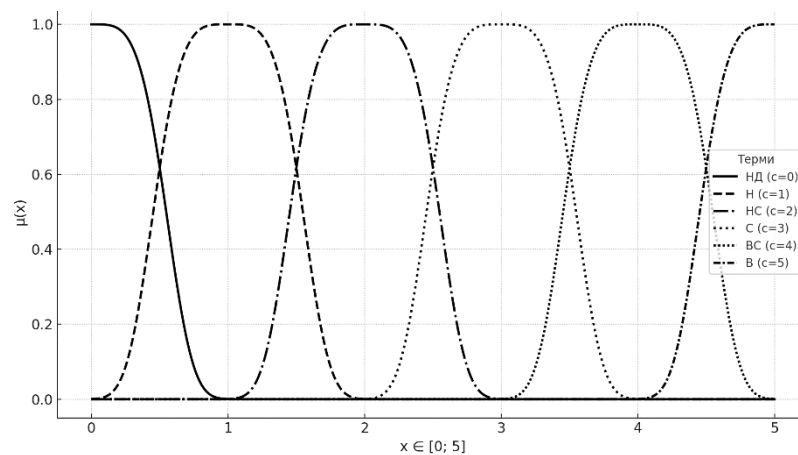


Рисунок 3.12 - Графічне зображення функції належності показника  $X_{10}$

Показник  $X_{11}$  – структурна доступність визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.12 - Функції належності для змінної  $X_{11}$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
НД	1	1.0	С	1	0.0
НД	2	0.0004	С	2	0.0004

НД	3	0.0	С	3	1.0
НД	4	0.0	С	4	0.0004
НД	5	0.0	С	5	0.0
Н	1	0.0004	В	1	0.0
Н	2	1.0	В	2	0.0
Н	3	0.0004	В	3	0.0
Н	4	0.0	В	4	0.0004
Н	5	0.0	В	5	1.0

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.13.

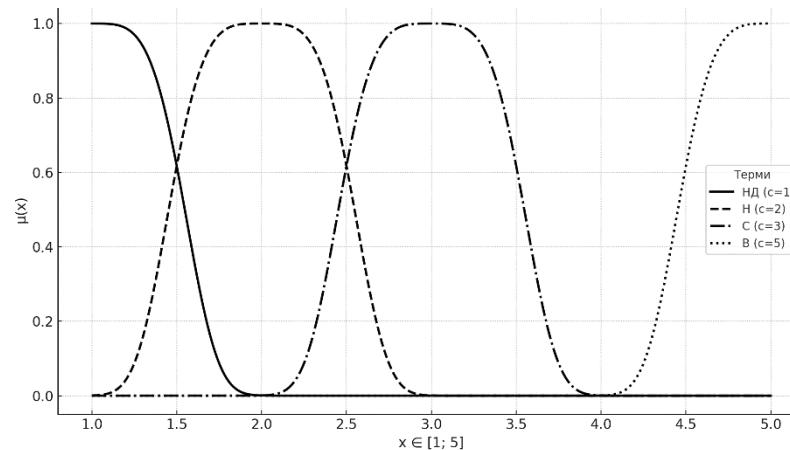


Рисунок 3.13 - Графічне зображення функції належності показника  $X_{11}$

Показник  $X_{12}$  – доступність передачі даних визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.13 - Функції належності для змінної  $X_{12}$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
НД	1	1.0	С	1	0.0
НД	2	0.0004	С	2	0.0004
НД	3	0.0	С	3	1.0
НД	4	0.0	С	4	0.0004
НД	5	0.0	С	5	0.0

Н	1	0.0004	В	1	0.0
Н	2	1.0	В	2	0.0
Н	3	0.0004	В	3	0.0
Н	4	0.0	В	4	0.0004
Н	5	0.0	В	5	1.0

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.14.

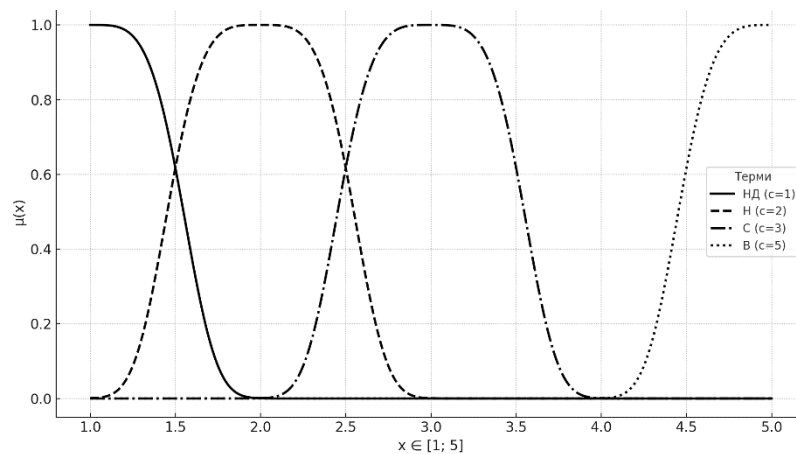


Рисунок 3.15 - Графічне зображення функції належності показника  $X_{12}$

Показник  $X_{13}$  – ступінь пріоритетності супутника визначений на універсальній множині 1–5 за допомогою сукупності нечітких термів (див. табл. 3.1).

Отримані такі нечіткі множини:

Таблиця 3.14 - Функції належності для змінної  $X_{13}$

Терм	$x$	$\mu(x)$	Терм	$x$	$\mu(x)$
Н	1	1.0	С	4	0.0004
Н	2	0.0004	С	5	0.0
Н	3	0.0	ВС	1	0.0
Н	4	0.0	ВС	2	0.0
Н	5	0.0	ВС	3	0.0004
НС	1	0.0004	ВС	4	1.0
НС	2	1.0	ВС	5	0.0004

НС	3	0.0004	В	1	0.0
НС	4	0.0	В	2	0.0
НС	5	0.0	В	3	0.0
С	1	0.0	В	4	0.0004
С	2	0.0004	В	5	1.0
С	3	1.0			

Отримані нечіткі множини в графічному вигляді наведені на рис. 3.15.

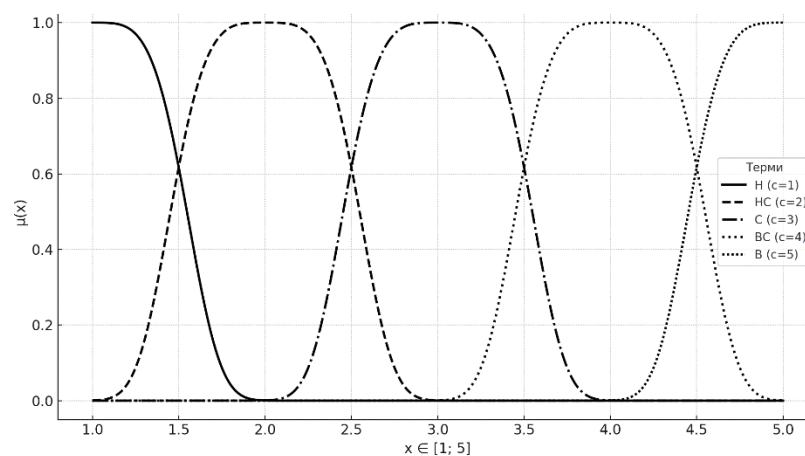


Рисунок 3.15 - Графічне зображення функції належності показника  $X_{13}$

Таким чином, знаючи значення функцій належності змінних до нечітких термів, отриманих на основі методу бальних оцінок та методу аналізу ієрархій Сааті, можна здійснити комплексну оцінку важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку.

Методика оцінювання важливості каналів передачі даних ССЗ представлена у вигляді поетапної процедури:

1. Формування лінгвістичних шкал оцінювання для кожного з показників важливості (змінних  $X_i$ ) та визначення відповідних універсальних множин та нечітких термів.

2. Розрахунок функцій належності  $\mu(x)$  для всіх значень кожної змінної, на основі побудованих шкал (зокрема з використанням П-подібних функцій або апроксимаційних виразів).

3. Формування матриць вагових коефіцієнтів за методом аналізу ієрархій (Сааті) для визначення відносної важливості показників у межах кожної складової (інформативність, доступність, пріоритетність).

4. Обчислення зважених значень функцій належності показників за методом бальної інтеграції:

$$\mu = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_i(x)$$

де  $w_i$  - вагові коефіцієнти, отримані з матриці Сааті;  $\mu_i(x)$  - значення функції належності відповідного показника.

5. Агрегація оцінок за кожною складовою (інформативність, доступність, пріоритетність) та обчислення узагальненої оцінки важливості каналу передачі даних.

6. Визначення рівня важливості каналу за максимальною інтегральною функцією належності або через класифікацію в лінгвістичній шкалі.

Таким чином, розроблено методику оцінювання важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку, що ґрунтується на застосуванні методів аналізу ієрархій, бальних оцінок та функцій належності нечітким термам.

Методика базується на багаторівневому представленні показників у вигляді ієрархічної структури, де за допомогою методів нечіткого оцінювання визначаються їх ваги, а далі агрегується інтегральна оцінка важливості каналу.

Результатом застосування даного підходу є чисельне значення ступеня важливості каналу супутникового зв'язку, що може бути використане для його ранжування та розподілу ресурсів спостереження.

Наукова новизна результату полягає в тому, що запропонована методика удосконалює існуючі підходи до оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку за рахунок:

- поєднання нечіткої логіки, методу аналізу ієрархій Сааті та методу бальних оцінок у єдиному апараті прийняття рішень;

- введення додаткових показників оцінювання, які раніше не враховувалися (наприклад, ступінь структурної доступності, миттєвої цінності, модуляційної складності тощо);

- інтеграції різнотипних показників у єдину лінгвістичну модель, що дозволяє підвищити об'єктивність оцінювання;

- реалізації інформаційної експертної системи, здатної здійснювати автоматизовану оцінку важливості каналів у режимі оперативного прийняття рішень.

Практична значущість розробленої методики полягає у вдосконаленні науково-методичного апарату забезпечення радіомоніторингу, зокрема:

- забезпеченні формалізованої обробки вхідних даних з різним ступенем визначеності;

- створенні алгоритму оцінювання, що адаптується до змін оперативно-тактичної обстановки;

- підвищенні достовірності та обґрунтованості рішень про пріоритетність каналів для спостереження.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Обґрунтовано перелік ключових показників, що визначають важливість каналів під час ведення радіомоніторингу систем супутникового зв'язку.

Встановлено доцільність їх об'єднання у єдиний інтегральний критерій важливості, який може використовуватись для оптимального розподілу засобів спостереження та пріоритетизації супутникових каналів зв'язку.

Розроблено методику оцінювання важливості каналів ССЗ, яка базується на поєднанні: побудови багаторівневої ієрархічної моделі показників, застосування методу аналізу ієрархій для визначення ваг складових, бального методу для оцінювання змінних, побудови функцій належності до нечітких термів та агрегації результатів у вигляді інтегральної оцінки важливості.

Застосування методики дозволяє кількісно визначити ступінь важливості супутникового каналу, що може бути використано як критерій у прийнятті рішень щодо розподілу ресурсів.

Науковою новизною методики оцінювання важливості каналів супутникового зв'язку є: поєднання методів нечіткої логіки, аналізу ієрархій і бального оцінювання, формування узагальненої моделі оцінювання, яка враховує як кількісні, так і якісні параметри, побудови інтегрованого критерію, що охоплює раніше не використовувані показники (наприклад, ступінь структурної доступності, пріоритетність задачі, інформативність сигналу тощо), розробки інформаційної системи підтримки рішень, що забезпечує оперативне оцінювання важливості каналів у реальних умовах функціонування ССЗ.

Достовірність результатів підтверджено використанням нечіткої бази знань, узгодженням результатів математичного моделювання з експертними оцінками, апробацією методики на прикладах оцінки каналів супутникового зв'язку в умовах різної доступності та інформативності.

## РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ  
ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА  
СИСТЕМАМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

Для оцінювання обґрунтованості прийнятих рішень під час створення інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження систем супутникового зв'язку, було проведено комплексне дослідження методик, викладених у другому та третьому розділах роботи. Послідовність проведення досліджень включала такі основні етапи: перевірка працездатності запропонованої методики оцінювання важливості каналів ССЗ шляхом поетапного розрахунку для конкретного прикладу з фіксованим вектором вхідних ознак та аналіз ефективності реалізації методу автоматизованого розподілу засобів спостереження з використанням нечіткого імовірнісного графа.

4.1. Практична реалізація методики оцінювання пріоритетності каналів систем супутникового зв'язку

Нехай конкретному каналу відповідає наступний фіксований вектор вхідних даних (ознак):

$$X = [45; 1.5; 0.85; 4.5; 2.5; 0.75; 4.8; 4.2; 3.7; 4.5; 3.2; 4.3; 3.5] \quad (4.1)$$

Інтерпретуючи вхідні дані значенням та термам отримаємо таблицю 4.1:  
Таблиця 4.1 - Вхідний вектор ознак супутникового каналу

№ з/п	Змінна	Назва показника	Значення	Універсальна множина	Коментар
1	$X_1$	Кут місця антени	45	[0; 90]	середній кут
2	$X_2$	Втрати на трасі	1.5	[0; 5]	допустимі втрати

3	$X_3$	Несуча частота і швидкість передачі	0.85	[0; 1]	висока
4	$X_4$	Параметри кодування	4.5	[1; 5]	визначено повністю
5	$X_5$	Завантаженість каналу	2.5	[1; 5]	середня
6	$X_6$	Доступ до смислової інформації	0.75	[0; 1]	висока
7	$X_7$	Пріоритетність задачі	4.8	[1; 5]	дуже висока
8	$X_8$	Цінність каналу	4.2	[1; 5]	вище середнього
9	$X_9$	Миттєва (оперативна) цінність	3.7	[1; 5]	середньо-висока
10	$X_{10}$	Енергетична доступність	4.5	[0; 5]	висока
11	$X_{11}$	Структурна доступність	3.2	[1; 5]	середня
12	$X_{12}$	Доступність передачі даних	4.3	[1; 5]	висока
13	$X_{13}$	Пріоритетність супутника	3.5	[1; 5]	помірно висока

Використовуючи знайдені функції належності вхідних змінних нечітким термам визначимо значення цих функції для вектора (4.1) і занесемо в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Значення функцій належності вхідним змінним

Зм.	Знач.	$\mu(x)$	Зм.	Знач.	$\mu(x)$	Зм.	Знач.	$\mu(x)$	Зм.	Знач.	$\mu(x)$
X1	45.0	0.2096	X4	4.5	0.8353	X8	4.2	0.0183	X11	3.2	0.0183
X1	45.0	0.8353	X4	4.5	0.8353	X8	4.2	0.3247	X11	3.2	0.3247
X1	45.0	0.8353	X5	2.5	0.0622	X8	4.2	0.8353	X11	3.2	0.8353
X1	45.0	0.2096	X5	2.5	0.6065	X8	4.2	0.6065	X11	3.2	0.6065
X2	1.5	0.0622	X5	2.5	0.6065	X9	3.7	0.0015	X11	3.2	0.0501
X2	1.5	0.6065	X5	2.5	0.0622	X9	3.7	0.0501	X12	4.3	0.0005
X2	1.5	0.6065	X5	2.5	0.0003	X9	3.7	0.6065	X12	4.3	0.0136
X2	1.5	0.0622	X6	0.75	0.0622	X9	3.7	0.8353	X12	4.3	0.2612
X2	1.5	0.0003	X6	0.75	0.9394	X9	3.7	0.3247	X12	4.3	0.9394
X2	1.5	0.0	X7	4.8	0.0	X10	4.5	0.0001	X12	4.3	0.7231
X3	0.85	0.0067	X7	4.8	0.0003	X10	4.5	0.0015	X13	3.5	0.0067
X3	0.85	0.9394	X7	4.8	0.0183	X10	4.5	0.0501	X13	3.5	0.1353
X4	4.5	0.0003	X7	4.8	0.6065	X10	4.5	0.6065	X13	3.5	0.8353
X4	4.5	0.0183	X7	4.8	0.9394	X10	4.5	0.8353	X13	3.5	0.8353
X4	4.5	0.3247	X8	4.2	0.0007	X10	4.5	0.8353	X13	3.5	0.1353

Наступним етапом кожному показнику всередині своєї групи (інформативності, доступності) призначено вагу  $w_i$ , отриману або через експертне порівняння:  $w_{X6} = 0.4, w_{X11} = 0.3, w_{X12} = 0.3, w_{X1} = w_{X2} = w_{X3} = w_{X4} = w_{X5} = w_{X10} = 0.2$  та  $w_{X7} = w_{X8} = w_{X9} = w_{X13} = 0.25$

Використовуючи логічні рівняння та значення з таблиць 4.2, розраховуються значення функцій належності ступеню важливості.

Результати оцінювання важливості каналу з урахуванням вагових коефіцієнтів (метод Сааті) та бального інтегрування:

Таблиця 4.3 - Результати оцінювання важливості каналу

Складова	Інтегральна оцінка
Інформативність	0.9082
Доступність	0.9317
Пріоритетність	0.8613
Загальна важливість каналу	0.9004

Канал має високу цінність для спостереження — загальна інтегральна оцінка перевищує 0.9. Це означає, що при плануванні розподілу засобів радіомоніторингу цей канал повинен отримувати високий пріоритет.

#### 4.2. Вибір та обґрунтування методів і критеріїв оцінювання функціональних характеристик інформаційної системи

Сутність оцінювання ефективності застосування автоматизованих інформаційних систем в будь-якій системній області полягає у порівнянні якості рішень, які приймаються оператором без автоматизованої інформаційної системи та з її використанням [50, 56].

Типова схема взаємодії оператора та ЕОМ, традиційна для більшості сучасних АСУ наведена на рис. 4.1 [65, 71].

Сучасні автоматизовані системи управління функціонують в умовах високої динаміки інформаційного середовища, обмеженого часу на прийняття рішень та суттєвої інформаційної невизначеності. У таких умовах особливої актуальності набуває забезпечення ефективної взаємодії між оператором і автоматизованою системою. Одним із найважливіших напрямів підвищення ефективності є автоматизація процесу інформаційної підготовки рішень — формування структурованої інформаційної моделі, яка дозволяє скоротити час на аналіз ситуації та забезпечити обґрунтованість вибору.

Базову схему функціонування АСУ складає оператор, який виконує функції первинного збору, аналізу інформації та прийняття рішень на основі власного досвіду. ЕОМ у цій конфігурації виконує лише функції обчислювача та інтерфейсу введення/виведення інформації.

У такій архітектурі інформаційна модель поточної ситуації створюється вручну самим оператором. Це призводить до значних часових витрат, які, як показують дослідження, можуть сягати до 50% і більше загального часу, відведеного на прийняття рішення. Така ситуація є неприйнятною в умовах обмеженого часу реагування.

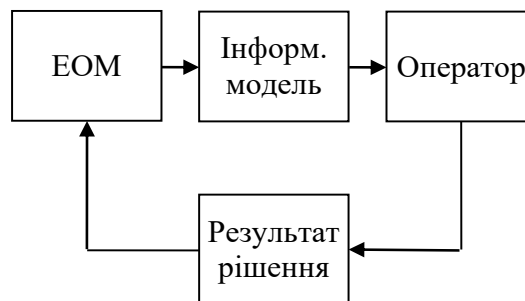


Рисунок 4.1 - Схема взаємодії оператора та ЕОМ

Відмінною особливістю такої схеми взаємодії оператора з ЕОМ є високі часові витрати, пов'язані з формуванням інформаційної моделі, тобто з процесом інформаційної підготовки до прийняття рішення.

Для підвищення результативності прийняття рішень пропонується вдосконалити схему взаємодії шляхом впровадження автоматизованого модуля формування інформаційної моделі. Така модель, забезпечить аналітичну обробку вхідних даних, ранжування варіантів рішень, генерацію рекомендацій та формалізовану підтримку прийняття рішень оператором.

Ця схема взаємодії відрізняється від наведеної на рис. 4.1 включенням контуру автоматизованого формування інформаційної моделі для підтримки прийняття рішення. Така модель має забезпечувати наявність усіх необхідних даних для аналізу конкретних варіантів розподілу, генерації можливих рішень, а також формування відповідних рекомендацій та інструкцій для оператора.

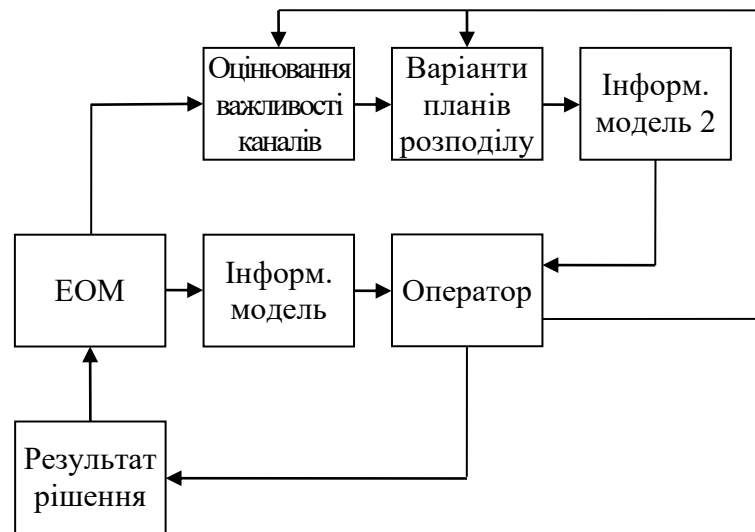


Рисунок 4.2 - Схема взаємодії оператора і ЕОМ з підготовкою прийняття рішення

Проведений аналіз процесу прийняття рішення дозволяє перейти до обґрунтування показників ефективності автоматизованої інформаційної системи і методів їх розрахунку.

Оцінювання ефективності ергатичних систем управління, у яких взаємодіють людина (оператор) та технічна система (ЕОМ), є важливим аспектом забезпечення надійності та продуктивності функціонування складних керованих об'єктів. Основними критеріями ефективності таких систем вважаються оперативність та якість прийнятих рішень.

Оперативність характеризує здатність системи забезпечити своєчасне реагування на зміну ситуації, тобто мінімізувати час від моменту виявлення події до моменту реалізації управлінського впливу. Це особливо важливо в умовах дефіциту часу, наприклад, при вирішенні задач розподілу засобів радіомоніторингу або реагування на критичні події у безпековій сфері.

Якість рішень, у свою чергу, визначається такими параметрами, як: точність - відповідність прийнятого рішення реальним умовам функціонування системи; безпомилковість - відсутність грубих логічних або функціональних помилок; оптимальність - наближеність рішення до

найкращого з можливих за обраним критерієм (наприклад, мінімум витрат або максимум ефективності).

Комбінація цих показників дозволяє отримати інтегральну оцінку ефективності, яка відображає загальну спроможність ергатичної системи забезпечити результативне функціонування в реальному часі. На практиці для кількісної оцінки такої ефективності часто використовується ймовірність прийняття своєчасного і якісного рішення - ключовий індикатор продуктивності системи.

Інтегральним показником, який враховує і оперативність і якість рішень є ймовірність своєчасного і якісного прийняття рішення.

$$P = P_s \cdot P_y \quad (4.2)$$

де  $P_s, P_y$  – відповідно ймовірності своєчасного і якісного рішення.

Традиційно методи оцінювання оперативності прийнятих рішень класифікуються на три основні групи: експериментальні, аналітичні та моделювальні (імітаційні). Кожна з них має свої особливості застосування залежно від етапу життєвого циклу системи та доступності вхідної інформації.

Експериментальні методи використовуються в умовах реальної експлуатації або випробувань системи. Оперативність визначається шляхом емпіричного вимірювання часу прийняття рішень:

$$P = \frac{N}{N_{\text{заг}}} \quad (4.3)$$

де  $N$  - кількість рішень, прийнятих у межах допустимого часу, а  $N_{\text{заг}}$  - загальна кількість рішень.

Цей підхід забезпечує високу достовірність, але потребує значних ресурсів та часу на проведення реальних сценаріїв.

Аналітичні методи застосовуються на етапі проектування або вдосконалення системи. За наявності статистичних або експертних даних використовуються ймовірнісні або нечіткі моделі для оцінки часових характеристик. Наприклад, при використанні експертних оцінок вводиться функція належності часу реакції:

$$\mu_T(t) = \begin{cases} 1, & t \leq T_{\text{опт}}, \\ \frac{T_{\text{макс}} - t}{T_{\text{макс}} - T_{\text{опт}}}, & T_{\text{опт}} < t \leq T_{\text{макс}} \\ 0, & t > T_{\text{макс}} \end{cases} \quad (4.4)$$

де  $T_{\text{опт}}$  - оптимальний час реакції,  $T_{\text{макс}}$  - максимально допустимий час.

Методи моделювання (імітаційні) полягають у створенні віртуального середовища, яке імітує функціонування системи в різних ситуаціях. Дозволяють досліджувати поведінку оператора, визначати критичні точки та оцінювати вплив змін у структурі або алгоритмах на оперативність.

Імітаційне моделювання дозволяє: тестувати систему без ризику, оцінювати різні сценарії розвитку подій, враховувати людський фактор через агентні моделі або нейромережеві емулятори.

Отже доцільним вважається використання аналітичних нечітких моделей для оцінювання ефективності застосування автоматизованої інформаційної системи.

4.3. Оцінювання ефективності використання інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження за системами супутникового зв'язку.

Оцінювання ефективності реалізованих методик, покладених в основу створеної інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу для ведення спостереження за системами супутникового

зв'язку, здійснено на основі аналізу алгоритму операторської діяльності з планування процесу радіомоніторингу.

Процедура розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ розпочинається з постановки та з'ясування завдання. Відповідно до отриманого завдання визначається множина актуальних районів і супутникових каналів передачі даних, що потребують першочергового спостереження.

Відбір каналів для спостереження базується на апріорній інформації, що була накопичена на попередніх етапах (пошук, первинне спостереження, попередній аналіз), та відображає їх потенційну цінність. Для формалізованого визначення важливості кожного з каналів виконується поетапна перевірка енергетичної, структурної та інформаційної доступності, що дозволяє виявити канали, які мають найбільшу цінність для подальшого інформаційного спостереження.

Зібрані значення параметрів подаються в інформаційну систему через відповідні інтерфейсні форми введення. Система здійснює автоматизовану обробку даних і формує значення інтегральної оцінки важливості каналів відповідно до обраної методики оцінювання (наприклад, скалярної згортки, нечіткої логіки, аналізу ієрархій тощо).

На основі обчислених оцінок система в автоматизованому режимі генерує рекомендований варіант розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ на відповідні супутникові канали зв'язку. Оператор виконує оцінку сформованого варіанту: у разі його прийнятності - затверджує запропоноване рішення та передає його на реалізацію, у разі потреби - ініціює повторний запуск процедури з урахуванням нових умов або коригувальних параметрів.

Алгоритм діяльності оператора та перелік операцій, що виконуються на кожному з етапів процесу підготовки рішення, розроблені на основі аналізу практичного досвіду, регламентів функціонування засобів радіомоніторингу ССЗ та логіки їх застосування.

З метою кількісного визначення ефективності створеної інформаційної системи було проведено експериментальне дослідження із залученням

операторів систем радіомоніторингу. У ході експерименту було змодельовано роботу поста ССЗ у двох конфігураціях:

- без застосування інформаційної системи (традиційний підхід);
- з використанням автоматизованої системи розподілу.

Критерієм оцінювання обрано час повного циклу прийняття рішення при різній кількості каналів, що підлягають розподілу. Результати експерименту свідчать про суттєве зменшення часу на підготовку та прийняття рішення при використанні запропонованої інформаційної системи, що наочно представлено на рис. 4.3.

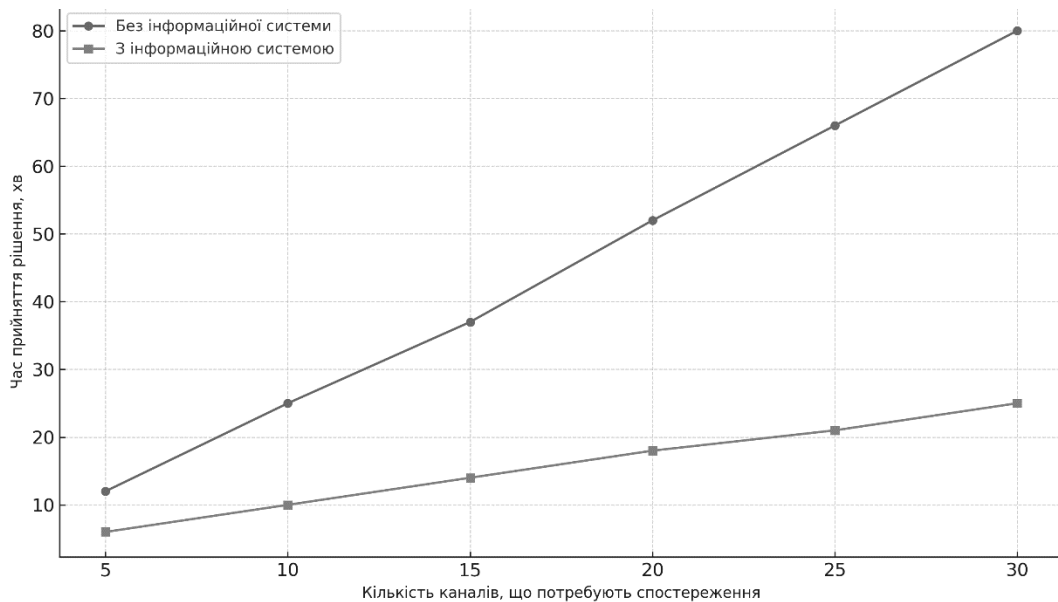


Рисунок 4.3 - Залежність витраченого часу на розподіл засобів радіомоніторингу для спостереження ССЗ

Перелік операцій алгоритму зведений у табл. 4.4, у якій також наведені значення ймовірно-часових характеристик (час виконання операції, ймовірність переходу до виконання окремої операції).

Таблиця 4.4 - Перелік операцій та логічних умов алгоритму оператора посту радіомоніторингу

№	Зміст операції, що виконується	Кількісні характеристики	
		час, с	ймовірність
1	Постановка задачі	40	1
2	Визначення множини каналів для спостереження	80	1
3	Вибір каналу	40	1
4	Налаштування на відповідний супутник	240	1
5	Попередня обробка, спектральний аналіз, виділення каналів	20	1
6	Перевірка енергетичної доступності	5	0,7
7	Розкриття виду модуляції, визначення несучої частоти та швидкості передачі	220	1
8	Визначення параметрів кодування	30	0,6
9	Запис сигналу для аналізу	10	1
10	Технічний аналіз сигналу	240	0,2
11	Визначення завантаженості каналу	20	1
12	Викриття значень основних показників важливості каналу	300	1
13	Оцінювання важливості каналу	680	1
14	Прийняття рішення щодо продовження аналізу	10	0,7
15	Розподіл засобів поста радіомоніторингу ССЗ на спостереження супутникових каналів передачі даних	20	1
16	Налаштування засобів поста радіомоніторингу на спостереження згідно визначеного плану	300	1

Для оцінювання ефективності виконання наведеного алгоритму пропонується використовувати ймовірність правильного виконання  $P_p$  і час виконання  $t$ . В ідеальному випадку даний алгоритм має відповідати умові максимальної безпомилковості при мінімальних часових витратах:

$$\begin{cases} P_p \rightarrow \max \\ t \rightarrow \min \end{cases} \quad (4.5)$$

Показники оцінювання мають враховувати як часові, так і ймовірнісні характеристики функціонування системи, що відображає її здатність виконувати завдання точно, швидко та стабільно. Визначення ефективності інформаційної системи у динамічних умовах дає змогу оцінити доцільність її використання в умовах реальної експлуатації.

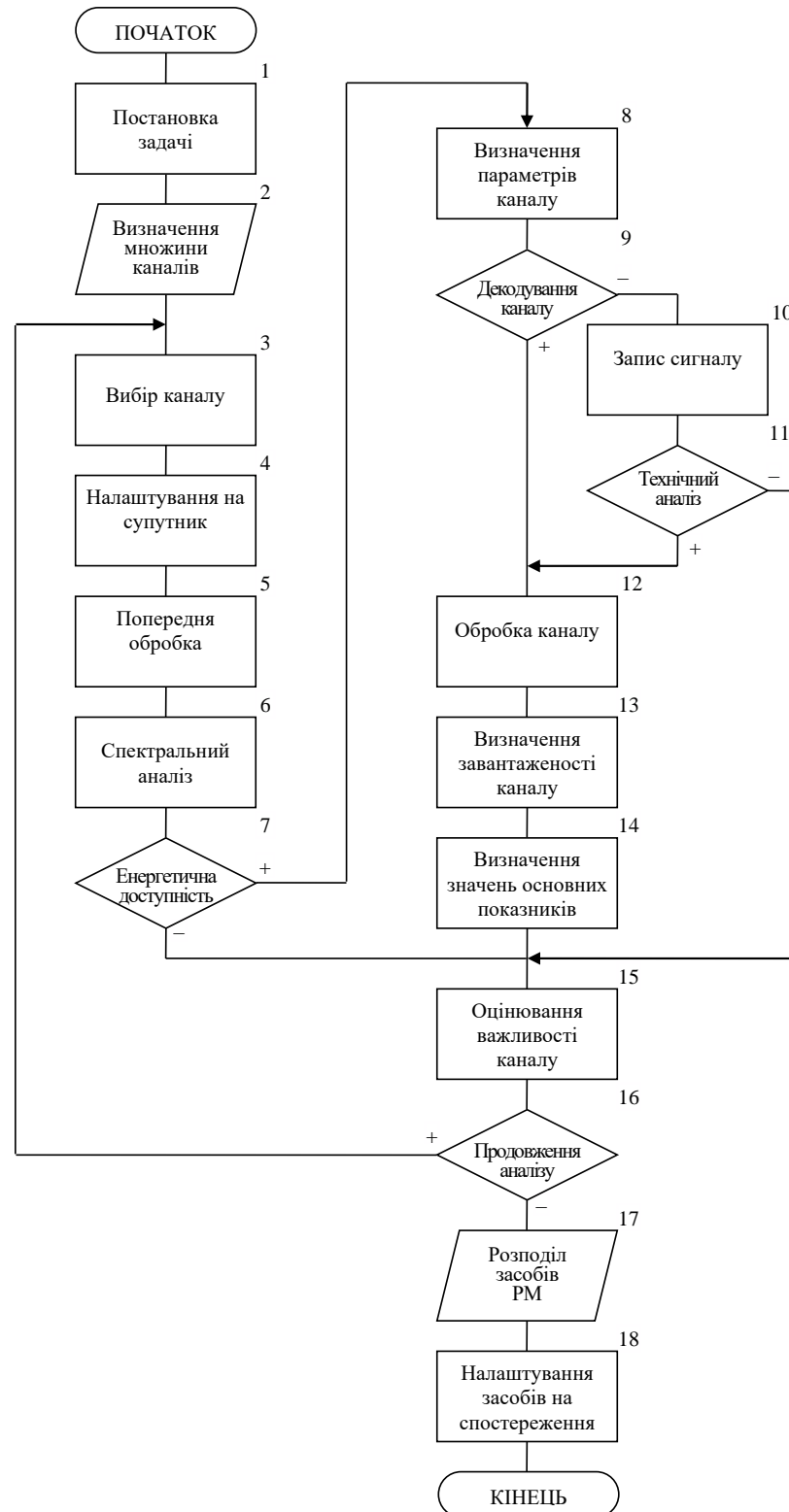


Рисунок 4.4 - Алгоритм операторської діяльності щодо підготовки здійснення радіомоніторингу

Дані для розрахунку отримано з операційної таблиці виконання дій у системі радіомоніторингу, яка включає 16 основних кроків. Для кожної

операції визначено тривалість виконання та ймовірність успішного завершення. Дані є типовими для практичної реалізації плану спостереження супутникових каналів.

Для моделювання роботи без автоматизації було введено аналітичне припущення про деградацію характеристик: ручне виконання потребує більше часу, а ризик помилок зростає. Це моделює ситуацію, коли оператор самостійно виконує задачі без підтримки алгоритмів та автоматизованих процедур.

Сумарний ефективний час виконання операцій дозволяє враховувати не лише час виконання окремих операцій, а й ймовірність їх успішного завершення. Такий підхід дозволяє обчислити очікувану тривалість всієї послідовності дій, яка з урахуванням імовірнісного характеру операцій відображає реальний експлуатаційний результат.

$$T_{\text{еф}} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot t_i = 2046.5 \text{ с} \quad (4.6)$$

Інверсна ефективність відображає ефективність реалізації окремих операцій за одиницю часу. Чим вища його величина, тим більше успішних дій може бути виконано за фіксований період. Він важливий для оцінки продуктивності системи в умовах обмеженого часу або при плануванні завдань реального часу.

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{t_i} = 0.5602 \quad (4.7)$$

Оскільки всі операції виконуються послідовно, відмова на будь-якому етапі перериває загальне виконання задачі. Отже, загальна ймовірність успішного проходження усієї процедури є добутком імовірностей кожного етапу. Цей показник дозволяє оцінити наскільки надійною є система в цілому.

$$P = \prod_{i=1}^n p_i = 0.0588 \quad (4.8)$$

При розрахунку показників без використання інформаційної системи імітаційне моделювання ручного режиму виконання дозволяє визначити, наскільки критичним є вплив автоматизації на ефективність системи. У цьому випадку кожна операція виконується довше, а ризик помилок зростає, що прямо впливає на загальний результат.

Збільшення часу на виконання операцій прямо впливає на затримки у добуванні інформації, що в умовах швидкоплинної обстановки може мати критичні наслідки. Після врахування змін ефективний час збільшується:

$$T_{\text{еф}}^{(\text{ручн})} = \sum_{i=1}^n p_i^* \cdot t_i^* = 2105.35 \text{ с} \quad (4.9)$$

При визначенні інверсної ефективності та зменшення її значення свідчить про загальне зниження продуктивності та втрату оперативності процесів. Різне падіння цього показника означає втрату темпу в реалізації задач радіомоніторингу.

$$E^{(\text{ручн})} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i^*}{t_i^*} = 0.3286 \quad (4.10)$$

Ймовірність завершення процесу при зниженні ймовірності успішного завершення процесу до значення нижче 0.1% свідчить про критичну ненадійність ручного підходу. Такий рівень означає, що система фактично не здатна забезпечити гарантоване виконання функцій у повному обсязі.

$$P^{(\text{ручн})} = \prod_{i=1}^n p_i^* = 0.000687 \quad (4.11)$$

Використовуючи порівняльний аналіз результатів на підставі виконаних розрахунків сформовано порівняльну таблицю. Зіставлення показників дозволяє наочно побачити переваги автоматизованої системи та підтверджує доцільність її впровадження:

Таблиця 4.5 - Показники з використанням інформаційної системи та без використання її

Показник	З ІС	Без ІС	Покращення
Сумарний ефективний час, с	2046.5	2105.35	зменшення на 3%
Інверсна ефективність	0.5602	0.3286	збільшення на 70%
Ймовірність успіху, %	5.88	0.0687	збільшення у 85 разів

Що стосується ймовірності правильного рішення, то інтегральну ймовірність правильного прийняття обчислимо:

$$P_{\text{ріш}} = P_{\text{усп}} \cdot P_{\text{лог}} \cdot P_{\text{опт}} \quad (4.12)$$

де:

- $P_{\text{усп}}$  - ймовірність успішного виконання всіх етапів;
- $P_{\text{лог}}$  - ймовірність логічно послідовного розрахунку (аналітична коректність);
- $P_{\text{опт}}$  - ймовірність того, що рішення максимально близьке до оптимального.

Таблиця 4.6 - Результати обрахунку ймовірності отримання правильного рішення

Компонента	Без використання ІС	З використанням ІС
$P_{\text{усп}}$	0.8500	0.9000
$P_{\text{лог}}$	0.9000	0.9600
$P_{\text{опт}}$	0.8900	0.9500
$P_{\text{ріш}}$	0.6809	0.8208

Ці дані демонструють не лише стабілізацію процесів, а й підвищення шансів на успішне виконання завдань, що критично важливо в оперативно-тактичному застосуванні.

Таким чином, розроблена система має всі передумови для подальшого впровадження та адаптації в сучасних умовах інформаційно-технічного розвитку.

4.4. Архітектура та програмна реалізація інформаційної системи автоматизованого планування та розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження за системами супутникового зв'язку

На основі положень, викладених у другому та третьому розділах, з метою підтвердження їх практичної коректності, а також забезпечення інструментальної реалізації розробленого математичного апарату, було створено інформаційну систему автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку на спостереження за каналами передачі даних.

У контексті автоматизації процесу прийняття рішень розрізняють два базових підходи: інформаційний, орієнтований на формальну обробку структурованих даних, та когнітивний, що моделює процеси людського мислення, прийняття рішень в умовах неповної або нечіткої інформації. У межах цієї роботи реалізовано саме когнітивний підхід. Він базується на

створенні бази знань у складі інформаційної системи та реалізації механізмів маніпулювання знаннями для забезпечення більш адаптивного і обґрунтованого прийняття рішень щодо розподілу наявних ресурсів радіомоніторингу.

Розроблена система акумулює знання, отримані на основі практичного досвіду виконання завдань радіомоніторингу ССЗ, а також застосовує формалізовані правила, що базуються на математичних моделях, зокрема методах нечіткої логіки та багатокритеріальної оптимізації. Це дозволяє в автоматизованому режимі формувати рекомендації щодо ефективного розподілу засобів спостереження, орієнтовані на змінні тактико-технічні умови.

Інформаційна система функціонує як модуль підтримки прийняття рішень, інтегрований у загальну архітектуру програмного забезпечення. Вона може бути використана як допоміжний інструмент на етапах планування, оперативного розподілу та адаптивного перерозподілу засобів радіомоніторингу як в умовах визначеності, так і в ситуаціях з високим рівнем невизначеності.

Висока якість функціонування системи забезпечується етапом інформаційної підготовки, який передбачає навчання системи на основі експертних знань. У процесі навчання оператор або фахівець-аналітик вводить в базу знань інформацію щодо характерних ситуацій, критеріїв оцінки каналів, параметрів розподілу, що у подальшому використовуються для формування нечітких продукційних правил. Отримання експертної інформації реалізується через структуроване опитування, анкетування або сценарне моделювання, результати яких обробляються з використанням методів аналізу ієрархій, лінгвістичних шкал та математичної нормалізації.

У ході експлуатації система працює з уже накопиченою базою знань, застосовуючи її для формування рекомендацій у режимі реального часу. Однак, завдяки реалізованому блоку донавчання, ІС може динамічно

уточнювати наявні знання, адаптуючись до змін у середовищі або уточнення значень показників важливості каналів.

Загалом, процес функціонування інформаційної системи поділяється на три ключові етапи:

1. Етап навчання, під час якого здійснюється формування початкової бази знань на основі експертних даних;
2. Етап функціонування, що відповідає за автоматизовану підтримку прийняття рішень у реальному масштабі часу;
3. Етап донавчання, який дозволяє за участю оператора уточнювати або доповнювати знання системи на основі результатів практичного функціонування та аналізу зворотного зв'язку.

Функціональне призначення інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ в умовах невизначеності охоплює:

- формування обґрунтованого плану розподілу засобів за задачами, каналами та супутниками;
- перевірку логічної та змістовної несуперечності бази знань;
- формування, вивід та документування рекомендацій щодо розподілу;
- забезпечення операторів необхідною довідковою та аналітичною інформацією.

На основі розробленої архітектури було створено структурну схему (рис. 4.5) інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ. У схемі виділено ключові функціональні блоки, які забезпечують повний цикл роботи системи — від формування знань до видачі обґрунтованих рекомендацій з урахуванням змін обстановки.



Рисунок 4.5 - Структурна схема інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ

До складу СПЗ входять наступні програмні блоки:

1. Експертна інформація. Цей блок формує джерело суб'єктивних знань, що базуються на практичному досвіді операторів радіомоніторингу. Інформація включає оцінки важливості каналів, типові сценарії розподілу засобів, а також вагові коефіцієнти критеріїв оцінювання. Вона подається у вигляді нечітких лінгвістичних шкал та числових матриць пріоритетів.

2. Об'єктивна інформація. Містить поточні, динамічно змінні дані: технічні характеристики супутників, трафік каналів, дані спектрального аналізу, перешкоди та обмеження. Ця інформація надходить від зовнішніх сенсорів, баз даних і обробляється для ухвалення рішення у режимі, наближеному до реального часу.

3. Етап навчання. Здійснюється ініціалізація бази знань: введення правил, нечітких множин і шкал оцінювання. Формується продукційна база

(правила типу «якщо-то») на основі експертного опитування та алгоритмів. Це дозволяє системі створити когнітивну модель предметної області.

4. Етап функціонування. Основна обчислювальна частина, де система, використовуючи базу знань та об'єктивні дані, формує план розподілу засобів. Реалізується механізм нечіткого логічного висновку, в результаті якого обчислюються ступені належності до класів розподілу та пріоритетів каналів.

5. База знань. Центральний модуль, який зберігає структури правил, ваги ознак, нечіткі множини, сценарії рішень. Підтримується динамічне оновлення структури знань у процесі донавчання.

6. Блок донавчання. Модуль адаптації: дозволяє системі уточнювати або доповнювати знання на основі зворотного зв'язку та аналізу результатів. Здійснюється у взаємодії з оператором або автоматично (за допомогою методу зваженої експертної адаптації).

7. Блок виведення рекомендацій. Цей блок агрегує результати логічного аналізу та формує вихідні рішення — плани спостереження, розподілу засобів, варіанти дій. Рекомендації можуть виводитись у текстовій, табличній або графічній формі, з поясненням логіки вибору.

8. Рекомендації щодо розподілу. Рекомендаційний блок, який видає готовий до реалізації план розподілу засобів, прив'язаний до задач, каналів і конкретних АРМ.

Таким чином, інформаційна система являє собою багаторівневу адаптивну архітектуру, в якій поєднуються формалізовані знання, алгоритмічна логіка та можливість врахування реального досвіду фахівців. Це дозволяє досягти високої ефективності навіть в умовах значної невизначеності.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

1. Розроблено архітектуру та програмну реалізацію інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку, що дозволяє в автоматизованому режимі формувати план спостереження за супутниковими каналами передачі даних із урахуванням їх важливості, доступності, інформативності та надійності. Інформаційна система реалізує когнітивний підхід до прийняття рішень, базуючись на формалізованій базі знань, правилах нечіткої логіки та експертній інформації.

2. Проведено комплексне оцінювання ефективності функціонування інформаційної системи, у тому числі за критеріями сумарного ефективного часу виконання операцій, інверсної ефективності та загальної ймовірності успішного завершення процесу розподілу. У моделі також враховано вплив людського фактора, а також похибки прийняття рішень у ручному режимі.

3. Показано, що застосування інформаційної системи забезпечує суттєве підвищення ймовірності правильного прийняття рішення: із 0.68 (у традиційній процедурі) до 0.82 після впровадження ІС. Це зумовлено покращенням точності логічного висновку, адаптивною структурою бази знань та зменшенням впливу суб'єктивних чинників на процес оцінювання каналів. Результати моделювання демонструють, що за рахунок автоматизації вдалося знизити сумарний ефективний час виконання операцій на більш ніж 3%, підвищити інверсну ефективність на 70%, а ймовірність повного успішного виконання процесу — у 85 разів. Це підтверджує доцільність інтеграції інформаційної системи в цикл оперативного планування та забезпечення радіомоніторингу ССЗ.

4. Запропонована інформаційна система має здатність до донавчання, що дозволяє оновлювати базу знань на основі зворотного зв'язку під час експлуатації. Це підвищує гнучкість системи та забезпечує її стійкість до змін умов середовища функціонування.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання - розробка методики та інформаційної системи оперативного розподілу засобів радіомоніторингу для ведення спостереження за системами супутникового зв'язку в умовах апріорної невизначеності, що дозволяє підвищити ефективність і оперативність радіомоніторингу. Розроблений підхід ґрунтується на інтеграції теорії нечіткої логіки, методів експертного оцінювання, математичного програмування, що в сукупності забезпечує адаптивність та надійність прийняття рішень.

На основі запропонованого науково-методичного апарату реалізовано інформаційну систему автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу, яка здатна функціонувати як в умовах повної визначеності, так і в умовах динамічної зміни параметрів та недостатньої вхідної інформації. Система дозволяє автоматизувати прийняття рішень щодо розподілу засобів на спостереження супутникових каналів, використовуючи сформовану базу знань, нечіткі правила, критерії важливості каналів і поточні оперативні дані.

Застосування розробленої інформаційної системи дало змогу зменшити час, необхідний для розподілу засобів, на 3%, зберігаючи при цьому достовірність рішень на рівні не нижче 0.82, що підтверджено в ході порівняльного оцінювання ймовірнісно-часових характеристик системи. За рахунок систематизації та узагальнення експертних знань, а також застосування алгоритмів нечіткого логічного висновку вдалося досягти максимальної повноти охоплення каналів зв'язку при оптимальному використанні наявних ресурсів.

У процесі досліджень отримано такі основні наукові результати:

1. Розроблено математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів передачі даних, яка відрізняється від відомих описом задачі у вигляді ітераційного процесу управління. Запропоновано використання рекурентних співвідношень на основі функцій

належності, що формалізують нечітку природу оцінки важливості каналів у динамічному середовищі.

2. Запропоновано систему критеріїв оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку, яка включає: енергетичну, структурну та інформаційну доступність, інформативність та надійність каналу, а також коефіцієнти пріоритетності на основі експертного аналізу.

3. Розроблено методику оцінювання важливості каналів отримала подальший розвиток за рахунок:

урахування втрат енергії сигналу в неоднорідному середовищі;

введення показників структурної доступності;

об'єднання показників інформативності та доступності у єдиний багатокритеріальний індекс;

побудови аналітичної моделі оцінювання з урахуванням нечіткого опису пріоритетів.

4. Удосконалено методику оптимального розподілу засобів радіомоніторингу, що базується на використанні нечітких ваг важливості каналів як критерію прийняття рішень. Це дозволило формувати раціональні плани навіть при змінності вихідних даних та неповноті інформації про обстановку.

5. Розроблено та обґрунтовано структуру інформаційної системи автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, яка реалізує когнітивний підхід на базі експертно-нечіткої моделі, містить модулі навчання, функціонування та донавчання, а також забезпечує інтеграцію об'єктивної та суб'єктивної інформації у процесі підтримки рішень.

6. Проведено оцінювання ефективності інформаційної системи, яке показало:

зростання інверсної ефективності на 70%;

зростання ймовірності повного успішного виконання процесу у 85 разів порівняно з ручним підходом;

підвищення ймовірності правильного прийняття рішення з 0.68 до 0.82.

7. Впровадження результатів дисертаційної роботи дозволить: підвищити достовірність і оперативність одержаної інформації, використовуючи апріорну інформацію. На основі проведених досліджень створено та реалізовано інформаційну систему автоматизованого розподілу засобів радіомоніторингу ССЗ, яка успішно пройшла апробацію у підрозділах радіомоніторингу супутникових каналів бойових частин ЗСУ. Її впровадження забезпечує підвищення оперативності планування на понад 3 %, при цьому досягається максимальна повнота охоплення каналів зв'язку без збільшення кількості використовуваних ресурсів.

Отримані результати доводять, що розроблена система дозволяє здійснювати розподіл засобів у масштабі часу, близькому до реального, з високою достовірністю та адаптивністю до змін обстановки. Впровадження інформаційної системи забезпечує підвищення оперативності, точності, гнучкості та надійності процесів планування радіомоніторингу без зниження якості ухвалених рішень.

Практична достовірність отриманих результатів забезпечена використанням апробованих математичних методів, моделюванням процесів на реальних сценаріях, та логічною узгодженістю моделі з реальними умовами ведення радіомоніторингу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. NATO STANAG 4635. Standardization Agreement for Satellite Spectrum Monitoring and Reporting. Brussels: NATO Standardization Office, 2023. 52 p.
2. Сигналов Ю.І. Теорія та практика РЕР: навч. посібник. — Харків: ХНУРЕ, 2020. — 168 с. — С. 85–88.
3. Семенчук К. М. Застосування нечіткої логіки в експертних системах оцінювання ризиків // Інформаційні технології і комп'ютерна інженерія, 2019, №1. — С. 90–95.
4. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Комп'ютерні мережі. Частина 1: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 336 с.
5. Варламов І.Д., Гаценко С.С. Модель інформаційних потоків у супутникових системах // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2014. - Вип. 4. - С. 47-56
6. Тимошенко В. А. Нечіткі системи та штучний інтелект: навч. посібник. – Київ: Наукова думка, 2018. – 320 с.
7. International Telecommunication Union (ITU-R). Recommendation ITU-R V.431-7: Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. – Geneva: ITU, 2015.
8. Бойко А.І., Винокуров С.В. Супутниковий зв'язок: теорія та практика. — К.: ДУТ, 2020. 248 с.
9. Stallings, W. (2020). Wireless Communications and Networks (2nd ed.). Pearson Education. - 656 p.
10. Куцик П. О., Миськів Б. Б. Застосування нечіткої логіки у задачах прийняття рішень в умовах невизначеності // Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Інформатика та управління — 2020. — №1. — С. 45–51.
11. Гаврилук А.С. Системи технічної розвідки в сучасному бою. — Збірник наукових праць НУОУ, 2022.

12. Загора О.В., Фещенко А.Б., Борисова Л.В., Собина В.О., Тарадуда Д.В., Демент М.О., Неклонський І.М. Національний університет цивільного захисту України, 2021 – 288с.

13. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навчальний посібник. – Київ: Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації КПП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 152 с.

14. Ковальчук О.В. Аналіз ефективності використання частотних ресурсів у супутникових системах зв'язку. // Радіотехніка. – 2016. – №187. – С. 45–52.

15. Борисов І.В., Рурський Т.Г., Ніщенко В.І., Хоменко П.В., Цімура Ю.В. Сучасні військові засоби радіо та супутникового зв'язку. Київ: Видавничий дім «Сварог», 2023 - 430 с.

16. Maral G., Bousquet M. Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology. – Hoboken: Wiley, 2017. – 880 p.

17. <https://www.ukrmilitary.com/2020/08/signal.html>

18. Baines, J., Smith, R. Modern Tactical SIGINT for Satellite Communications. — NATO Communications Journal, 2023.

19. Мельник В.П. Методи підвищення завадостійкості супутникових каналів зв'язку в діапазонах С та Ku. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2018. – №895. – С. 102–108.

20. Петренко І.М. Особливості радіомоніторингу супутникових систем зв'язку в X-діапазоні частот. // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління. – 2019. – №4(60). – С. 67–73.

21. Сидоренко Л.Г., Ткаченко О.В. Аналіз загроз безпеці інформації в супутникових системах зв'язку та методи їх нейтралізації. // Інформаційна безпека та інформаційні технології. – 2020. – №2(28). – С. 35–42.

22. Конахович Г.Ф., Климчук В.П., Паук С.М., Потапов В.Г., Горбунов О.О. Захист інформації в телекомунікаційних системах: навчальний посібник. – Київ: Національний авіаційний університет, 2016. – 248 с.

23. Турбан Е.Ф. Системи підтримки прийняття рішень і інтелектуальні системи. – Львів: Сполом, 2017.– 450 с.
24. Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. – Київ: ВІТІ, 2021. – 302 с.
25. Richharia M., Westbrook L. Satellite Communications Systems: Design Principles. – Hoboken: Wiley, 2019. – 648 p.
26. Defense Express. Використання Starlink в умовах бойових дій: загрози та виклики. — Аналітика, 2023.
27. Sklar, B. (2017). Digital Communications: Fundamentals and Applications (2nd ed.).Prentice Hall. — 1104 p.
28. Ігнатенко П. Г., Шевчук А. Ю. Моделі нечіткого логічного виведення в інтелектуальних системах аналізу даних // Наукові праці ОНАХТ. Серія: Комп'ютерні науки — 2021. — №53. — С. 100–108.
29. Полінкевич О. М., Волинець І. Г. Обґрунтування управлінських рішень та оцінювання ризиків: навч. посібник. – Вінниця: Вежа-Друк, 2023. – 232 с.
30. Kupchan, C. Isolationism: A History of America's Efforts to Shield Itself from the World. New York: Oxford University Press, 2020. - 464 с.
31. Литвиненко О. Глобальні тренди у сфері безпеки та оборони: виклики для України. Київ: Національний інститут стратегічних досліджень, 2021 - 320 с.
32. Wertz J.R., Larson W.J. Space Mission Engineering: The New SMAD. – Hawthorne: Microcosm Press, 2019. – 1042 p.
33. <https://www.ucrf.gov.ua/pres-centr/news/suputnykovyi-zv'язok-shcho-obiednuie-vsesvit>
34. Гарасим О.І. Концептуальні моделі захисту інформації для технологій стаціонарного, стільникового та супутникового зв'язку // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2021. – № 2(110). – С. 87–98.

35. Іванов Д.А., Олійник Р.М., Живець Ю.М., Іванова В.А. Розвідувально-ударні системи в мережево-центричній війні. – Наукові праці ДНДІ ВС ОВТ, 2024, вип. 1(19).
36. Тарнавський Ю.А., Кузьменко І.М. Організація комп'ютерних мереж: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 312 с.
37. Doyle, J., & Akin, D. (2022). *Decision Support Systems for Satellite Operations*. MIT Press. — 412 p.
38. Берлянд, В. Л. Методи математичної оптимізації. — Київ: Наукова думка, 1982. — 310 с.
39. Gilli, A. & Gilli, M. (). *AI, Autonomous Systems and the Future of Warfare*. European Union Institute for Security Studies (EUISS), 2021 - 234 с.
40. Benedict S.H. *Satellite Frequency Coordination and Planning*. – Boston: Artech House, 2016. – 312 p.
41. Лаврут О., Лаврут Т., Климович О., Здоренко Ю. Новітні технології та засоби зв'язку у ЗСУ: шлях трансформації та перспективи розвитку. – *Ukrainian Military Pages*, 2019.
42. Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2021). *Introduction to Operations Research (11th Edition)*. McGraw-Hill Education. — 1216 p.
43. Капінос В. В., Попович В. І. Нечітка логіка як інструмент для побудови гібридних експертних систем // Системи обробки інформації (ХАІ) — 2019. — Вип. 4(155). — С. 92–98.
44. Haass, R. *The World: A Brief Introduction*. New York: Penguin Press, 2020. - 400 с.
45. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3-rd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010. – 1152 p.
46. Zimmermann H. J. *Fuzzy Set Theory — and Its Applications*, 4th Ed. — Springer, 2001.
47. Bertsekas, D. P. (2017). *Dynamic Programming and Optimal Control (4th Edition)*. Athena Scientific. — Vol. 1: 576 p.

48. Allison, G. *Destined for War: Can America and China Escape Thucydides's Trap?* (Updated Edition). Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2021 - 384 с.
49. Ушенко Ю.О., Негрич А.Л., Галочкін О.В. Глобальна інформаційна інфраструктура інфокомунікаційних мереж та систем: навчальний посібник. – Чернівці: Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, 2021. – 224 с.
50. Данилюк М. І. Інформаційні технології в управлінні. — Львів: Новий Світ, 2020. — 368 с.
51. Єгоров В. Система автоматизованого програмного управління антенною системою супутникового радіомоніторингу. Екологічна безпека та природокористування//Збірник наукових праць: вип. 4 (52), 99–105. 2024.
52. Даник Ю. Г. Національна безпека: запобігання критичним ситуаціям: монографія / Ю. Г. Даник, Ю. І. Катков, М. Ф. Пічугін. – Житомир : Рута, 2006. – 388 с.
53. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій / Ю. П. Зайченко. – К. : Вид. дім «Слово», 2006. – 816 с.
54. Застосування космічних систем для забезпечення дій збройних сил: навчальний посібник / М. С. Пастушенко, В. І. Присяжний, В. О. Яновський та ін.; за ред. В. І. Ткаченка. – Харків : ХВУ, 2003. – 192 с.
55. Vasył Trysnyuk, Volodymyr Yehorov, Serhii Tymchuk, Taras Trysnyuk. Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. ITTAP 2022. Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2022. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2022). P. 117-123. Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2022.
56. Saaty T. L. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World.* — Pittsburgh: RWS Publications, 2008. - 315 p.
57. Improvement Of The System Of Automated Pointing Of The Antenna To The Satellite. V. Ehorov, T. Trysnyuk, V. Prystupa, Ye. Nahornyj, V. Marushchak

European Association of Geoscientists&Engineers 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2022, Volume 2022, p.1 – 5.

58. Walt, S. The Hell of Good Intentions: America's Foreign Policy Elite and the Decline of U.S. Primacy. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2019 - 400 с.

59. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Технології передачі даних: швидкість та стабільність роботи мережі систем зв'язку. Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 12-13 листопада 2024 р., с.65–67

60. Ковбасюк С. В. Метод найменших квадратів та його практичне застосування: монографія / С. В. Ковбасюк, О. О. Писарчук, М. Ю. Ракушев. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2008. – 228 с.

61. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Методи та алгоритми перехоплення супутникових систем зв'язку. 22 Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення». Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України м. Київ 14-15 листопада 2023 р. с. 109-110.

62. Brands, H. & Beckley, M. Danger Zone: The Coming Conflict with China. New York: W.W. Norton & Company, 2022 - 280 с.

63. Ковбасюк С. В. Теоретичні основи автоматизації процесів вироблення рішень у системах управління: навч. посіб. / С. В. Ковбасюк, О. О. Писарчук. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – 132 с.

64. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Пристрій автоматизованого програмного управління антеною системи супутникового радіомоніторингу. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 181-183.

65. Шевченко В. С., Розум С. І. Системи підтримки прийняття рішень. — Київ: Видавництво «Центр учбової літератури», 2022. — 320 с.

66. Сметанін К.В., Єгоров В.О. Основні тенденції розвитку надзвичайних ситуацій терористичного характеру на потенційно небезпечних об'єктах. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року. Колективна монографія за матеріалами XX Міжнародної науково-практичної конференції. (Київ, 04-08 жовтня 2021 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. — К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2021. — с. 153-154. ISBN 978-617-7854-58-5.

67. Ставісюк Р.Л., Єгоров В.О., Гайка Ю.А., Гончаров Д.О. Проблемні питання побудови захищених комп'ютерних мереж для забезпечення захисту інформації в спеціальних мережах підрозділів Збройних Сил України.

68. Ліпатов А. О. Основи супутникових телекомунікаційних систем : навч. посіб. / А. О. Ліпатов, М. О. Могильченко, М. О. Коломицев ; під ред. А.О. Ліпатова. — К. : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2004. — 220 с.

69. Манойлов В. П. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації: монографія / В. П. Манойлов, В. В. Омельчук, В. В. Опанюк. — Житомир : ЖДТУ, 2008. — 384 с.

70. Gagliardi R.M. Satellite Communications. — New York: John Wiley & Sons, 2020. — 384 p.

71. Лозовський С. І., Іванюк Г. І. Автоматизовані системи управління: методологія створення та функціонування. — Київ: НАУ, 2021. — 312 с.

72. Тарасов В. О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: Теорія, синтез, ефективність / В. О. Тарасов, Б. М. Герасимов, І. О. Левін, В. О. Корнійчук. — К. : МАКНС, 2007. — 336 с.

73. Шумко Л. Г. Вища математика. Ч. І: навч. посібник / Л. Г. Шумко, Л. І. Шумко. — Житомир : ЖВІ НАУ, 2010. — 348 с.

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

Таблиця А - Таблиця ваг для значень лінгвістичних змінних

Лінгвістичний терм	Скорочення	Інтерпретація	Центр ФН	Вага (бал)
Низький рівень	Н	Дуже слабке значення	1.0	2.0
Нижче середнього	НС	Менше за типово	2.5	4.0
Середній	С	Допустиме значення	3.0	6.0
Вище середнього	ВС	Більше за типово	4.0	8.0
Високий рівень	В	Максимально бажане значення	4.75	9.5

Таблиця А.1 - Таблиця спеціальних термів

Терм	Інтерпретація	Центр	Вага
НВ – Не визначено	Рівень невизначеності/відсутності	0.2	1.5
ВСП – Визначено стек протоколів	Повна визначеність	0.9	9.0
ЗВ – Значно визначено	Повне розкриття	0.9	9.0
НД – Недоступно	Приєм неможливий	0.5	1.0
ОД – Обмежено доступно	Мінімальний доступ	1.5	3.0
Д – Доступно	Прийнятне	2.5	5.0
ВП – Впевнене приймання	Ідеальне положення антени	3.5	8.0
ЗПР – Значно перевищує резерв	Надлишкова втрата сигналу	3.8	1.0
ПР – Перевищує резерв	Втрата сигналу	3.0	3.0
ДР – Дорівнює резерву	Критичне значення	2.0	5.0
НР – Нижче резерву	Втрати менші за допустимі	1.5	7.0
ЗНР – Значно нижче резерву	Сигнал дуже потужний	0.5	9.0

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б - Матриця знань оцінювання важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_6$	НВ	$X_8$	Н	Низька
$X_6$	НВ	$X_8$	НС	Низька
$X_6$	НВ	$X_8$	С	Низька
$X_6$	НВ	$X_8$	ВС	Нижче середнього
$X_6$	НВ	$X_8$	В	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_8$	Н	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_8$	НС	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_8$	С	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_8$	ВС	Середня
$X_6$	ВСП	$X_8$	В	Середня
$X_6$	НВ	$X_9$	Н	Низька
$X_6$	НВ	$X_9$	НС	Низька
$X_6$	НВ	$X_9$	С	Низька
$X_6$	НВ	$X_9$	ВС	Нижче середнього
$X_6$	НВ	$X_9$	В	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_9$	Н	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_9$	НС	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_9$	С	Нижче середнього
$X_6$	ВСП	$X_9$	ВС	Середня
$X_6$	ВСП	$X_9$	В	Середня
$X_8$	Н	$X_9$	Н	Низька
$X_8$	Н	$X_9$	НС	Низька
$X_8$	Н	$X_9$	С	Низька
$X_8$	Н	$X_9$	ВС	Нижче середнього

Продовження табл. Б

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_8$	Н	$X_9$	В	Нижче середнього
$X_8$	НС	$X_9$	Н	Низька
$X_8$	НС	$X_9$	НС	Низька
$X_8$	НС	$X_9$	С	Низька
$X_8$	НС	$X_9$	ВС	Нижче середнього
$X_8$	НС	$X_9$	В	Нижче середнього
$X_8$	С	$X_9$	Н	Низька
$X_8$	С	$X_9$	НС	Низька
$X_8$	С	$X_9$	С	Низька
$X_8$	С	$X_9$	ВС	Нижче середнього
$X_8$	С	$X_9$	В	Нижче середнього
$X_8$	ВС	$X_9$	Н	Нижче середнього
$X_8$	ВС	$X_9$	НС	Нижче середнього
$X_8$	ВС	$X_9$	С	Нижче середнього
$X_8$	ВС	$X_9$	ВС	Середня
$X_8$	ВС	$X_9$	В	Середня
$X_8$	В	$X_9$	Н	Нижче середнього
$X_8$	В	$X_9$	НС	Нижче середнього
$X_8$	В	$X_9$	С	Нижче середнього
$X_8$	В	$X_9$	ВС	Середня
$X_8$	В	$X_9$	В	Середня
$X_7$	НД	$X_2$	ЗПР	Низька
$X_7$	НД	$X_2$	ПР	Низька
$X_7$	НД	$X_2$	ДР	Низька
$X_7$	НД	$X_2$	НР	Нижче середнього
$X_7$	НД	$X_2$	ЗНР	Нижче середнього
$X_7$	ОД	$X_2$	ЗПР	Низька

Продовження табл. Б

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_1$	ОД	$X_2$	ПР	Низька
$X_1$	ОД	$X_2$	ДР	Низька
$X_1$	ОД	$X_2$	НР	Нижче середнього
$X_1$	ОД	$X_2$	ЗНР	Нижче середнього
$X_1$	Д	$X_2$	ЗПР	Низька
$X_1$	Д	$X_2$	ПР	Низька
$X_1$	Д	$X_2$	ДР	Низька
$X_1$	Д	$X_2$	НР	Нижче середнього
$X_1$	Д	$X_2$	ЗНР	Нижче середнього
$X_1$	ВП	$X_2$	ЗПР	Нижче середнього
$X_1$	ВП	$X_2$	ПР	Нижче середнього
$X_1$	ВП	$X_2$	ДР	Нижче середнього
$X_1$	ВП	$X_2$	НР	Середня
$X_1$	ВП	$X_2$	ЗНР	Середня
$X_{10}$	НД	$X_{11}$	НД	Низька
$X_{10}$	НД	$X_{11}$	Н	Низька
$X_{10}$	НД	$X_{11}$	С	Низька
$X_{10}$	НД	$X_{11}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	Н	$X_{11}$	НД	Низька
$X_{10}$	Н	$X_{11}$	Н	Низька
$X_{10}$	Н	$X_{11}$	С	Низька
$X_{10}$	Н	$X_{11}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	НС	$X_{11}$	НД	Низька
$X_{10}$	НС	$X_{11}$	Н	Низька
$X_{10}$	НС	$X_{11}$	С	Низька
$X_{10}$	НС	$X_{11}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	С	$X_{11}$	НД	Низька

Продовження табл. Б

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_{10}$	С	$X_{11}$	Н	Низька
$X_{10}$	С	$X_{11}$	С	Низька
$X_{10}$	С	$X_{11}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	ВС	$X_{11}$	НД	Нижче середнього
$X_{10}$	ВС	$X_{11}$	Н	Нижче середнього
$X_{10}$	ВС	$X_{11}$	С	Нижче середнього
$X_{10}$	ВС	$X_{11}$	В	Середня
$X_{10}$	В	$X_{11}$	НД	Нижче середнього
$X_{10}$	В	$X_{11}$	Н	Нижче середнього
$X_{10}$	В	$X_{11}$	С	Нижче середнього
$X_{10}$	В	$X_{11}$	В	Середня
$X_{10}$	НД	$X_{12}$	НД	Низька
$X_{10}$	НД	$X_{12}$	Н	Низька
$X_{10}$	НД	$X_{12}$	С	Низька
$X_{10}$	НД	$X_{12}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	Н	$X_{12}$	НД	Низька
$X_{10}$	Н	$X_{12}$	Н	Низька
$X_{10}$	Н	$X_{12}$	С	Низька
$X_{10}$	Н	$X_{12}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	НС	$X_{12}$	НД	Низька
$X_{10}$	НС	$X_{12}$	Н	Низька
$X_{10}$	НС	$X_{12}$	С	Низька
$X_{10}$	НС	$X_{12}$	В	Нижче середнього
$X_{10}$	С	$X_{12}$	НД	Низька
$X_{10}$	С	$X_{12}$	Н	Низька
$X_{10}$	С	$X_{12}$	С	Низька
$X_{10}$	С	$X_{12}$	В	Нижче середнього

Продовження табл. Б

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_{10}$	BC	$X_{12}$	НД	Нижче середнього
$X_{10}$	BC	$X_{12}$	Н	Нижче середнього
$X_{10}$	BC	$X_{12}$	С	Нижче середнього
$X_{10}$	BC	$X_{12}$	В	Середня
$X_{10}$	В	$X_{12}$	НД	Нижче середнього
$X_{10}$	В	$X_{12}$	Н	Нижче середнього
$X_{10}$	В	$X_{12}$	С	Нижче середнього
$X_{10}$	В	$X_{12}$	В	Середня
$X_3$	НВ	$X_4$	Н	Низька
$X_3$	НВ	$X_4$	НС	Низька
$X_3$	НВ	$X_4$	С	Низька
$X_3$	НВ	$X_4$	BC	Нижче середнього
$X_3$	НВ	$X_4$	В	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_4$	Н	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_4$	НС	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_4$	С	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_4$	BC	Середня
$X_3$	ЗВ	$X_4$	В	Середня
$X_3$	НВ	$X_5$	Н	Низька
$X_3$	НВ	$X_5$	НС	Низька
$X_3$	НВ	$X_5$	С	Низька
$X_3$	НВ	$X_5$	BC	Нижче середнього
$X_3$	НВ	$X_5$	В	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_5$	Н	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_5$	НС	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_5$	С	Нижче середнього
$X_3$	ЗВ	$X_5$	BC	Середня

Продовження табл. Б

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_3$	ЗВ	$X_5$	В	Середня
$X_4$	Н	$X_5$	Н	Низька
$X_4$	Н	$X_5$	НС	Низька
$X_4$	Н	$X_5$	С	Низька
$X_4$	Н	$X_5$	ВС	Нижче середнього
$X_4$	Н	$X_5$	В	Нижче середнього
$X_4$	НС	$X_5$	Н	Низька
$X_4$	НС	$X_5$	НС	Низька
$X_4$	НС	$X_5$	С	Низька
$X_4$	НС	$X_5$	ВС	Нижче середнього
$X_4$	НС	$X_5$	В	Нижче середнього
$X_4$	С	$X_5$	Н	Низька
$X_4$	С	$X_5$	НС	Низька
$X_4$	С	$X_5$	С	Низька
$X_4$	С	$X_5$	ВС	Нижче середнього
$X_4$	С	$X_5$	В	Нижче середнього
$X_4$	ВС	$X_5$	Н	Нижче середнього
$X_4$	ВС	$X_5$	НС	Нижче середнього
$X_4$	ВС	$X_5$	С	Нижче середнього
$X_4$	ВС	$X_5$	ВС	Середня
$X_4$	ВС	$X_5$	В	Середня
$X_4$	В	$X_5$	Н	Нижче середнього
$X_4$	В	$X_5$	НС	Нижче середнього
$X_4$	В	$X_5$	С	Нижче середнього
$X_4$	В	$X_5$	ВС	Середня
$X_4$	В	$X_5$	В	Середня
$X_7$	Н	$X_{13}$	Н	Низька

Продовження табл. Б

Змінна 1	Значення 1	Змінна 2	Значення 2	Висновок
$X_7$	Н	$X_{13}$	НС	Низька
$X_7$	Н	$X_{13}$	С	Низька
$X_7$	Н	$X_{13}$	ВС	Нижче середнього
$X_7$	Н	$X_{13}$	В	Нижче середнього
$X_7$	НС	$X_{13}$	Н	Низька
$X_7$	НС	$X_{13}$	НС	Низька
$X_7$	НС	$X_{13}$	С	Низька
$X_7$	НС	$X_{13}$	ВС	Нижче середнього
$X_7$	НС	$X_{13}$	В	Нижче середнього
$X_7$	С	$X_{13}$	Н	Низька
$X_7$	С	$X_{13}$	НС	Низька
$X_7$	С	$X_{13}$	С	Низька
$X_7$	С	$X_{13}$	ВС	Нижче середнього
$X_7$	С	$X_{13}$	В	Нижче середнього
$X_7$	ВС	$X_{13}$	Н	Нижче середнього
$X_7$	ВС	$X_{13}$	НС	Нижче середнього
$X_7$	ВС	$X_{13}$	С	Нижче середнього
$X_7$	ВС	$X_{13}$	ВС	Середня
$X_7$	ВС	$X_{13}$	В	Середня
$X_7$	В	$X_{13}$	Н	Нижче середнього
$X_7$	В	$X_{13}$	НС	Нижче середнього
$X_7$	В	$X_{13}$	С	Нижче середнього
$X_7$	В	$X_{13}$	ВС	Середня
$X_7$	В	$X_{13}$	В	Середня

## ДОДАТОК В Акт реалізації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Житомирського військового  
інституту імені С.П. Корольова  
полковник Андрій СЛЮСАРЕНКО  
" 4 " 06. 2025 року



АКТ

### про реалізацію результатів наукових досліджень ЄГОРОВА Володимира Олександровича

Комісія у складі: голова – начальник кафедри радіоелектронної розвідки кандидат технічних наук, доцент полковник РОГОВЕЦЬ М. та члени комісії – професор кафедри радіоелектронної розвідки, кандидат технічних наук, старший дослідник підполковник СТАВІСЮК Р. та доцент кафедри радіоелектронної розвідки, кандидат технічних наук підполковник ТИМЧУК С. склали цей акт про те, що результати наукових досліджень присвячених розробці інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження систем супутникового зв'язку, які особисто отримані підполковником ЄГОРОВИМ В., а саме:

методика визначення важливості супутникових каналів зв'язку

реалізовані в освітньому процесі Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова в якості методичного матеріалу при проведенні занять з навчальних дисциплін "Комплекси радіоелектронної розвідки" та "Програмно-апаратне забезпечення комплексів радіоелектронної розвідки" на кафедрі радіоелектронної розвідки.

Голова комісії:

начальник кафедри  
кандидат технічних наук, доцент  
полковник

Максим РОГОВЕЦЬ

Члени комісії:

професор кафедри  
кандидат технічних наук, старший дослідник  
підполковник

Роман СТАВІСЮК

доцент кафедри  
кандидат технічних наук  
підполковник

Сергій ТИМЧУК

  
 МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ  
 УКРАЇНИ  
 ВІЙСЬКОВА ЧАСТИНА  
 А2667  
 Код 26621780  
 « П » 06 2025р.  
 № 319

04176, м. Київ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Командир військової частини А2667

генерал-майор

Сергій ДВОРЕЦЬКИЙ

2025 року

АКТ

**про реалізацію результатів наукових досліджень  
 підполковника Єгорова Володимира Олександровича**


Комісія у складі: голови полковника Кузнецова Д.О. та членів комісії полковника Оксенчука І.С. та полковника Йолкіна Ю.В. встановила, що наукові положення, розроблені особисто підполковником Єгоровим В.О., а саме: методика оцінювання важливості супутникових каналів зв'язку та математичне моделювання процесу оптимального розподілу засобів радіомоніторингу систем супутникового зв'язку реалізовані у вигляді інформаційної системи розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження систем супутникового зв'язку.

Розроблена інформаційна система дає змогу побудувати систему підтримки прийняття рішень, яка допомагає оператору поста радіомоніторингу ухвалювати рішення в реальному часі, надаючи рекомендації на основі аналізу даних, прогнозів та варіативних сценаріїв.

Передбачається використання зазначеної інформаційної системи як допоміжного засобу на етапах планування, оперативного розподілу та адаптивного перерозподілу засобів радіомоніторингу в умовах апріорної невизначеності.

Голова комісії:


полковник

  
 (підпис)

Дмитро КУЗНЕЦОВ

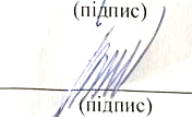
Члени комісії:

полковник

  
 (підпис)

Ігор ОКСЕНЧУК

полковник

  
 (підпис)

Юрій ЙОЛКІН