

УДК 621.391.372

Бондаренко Л. О. ORCID: 0000-0003-1850-0508 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
канд. техн. наук Масесов М. О. ORCID: 0000-0003-4537-4295 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
канд. техн. наук Коваленко І. Г. ORCID: 0000-0002-6827-5196 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Руденко В. І. ORCID: 0000-0003-3563-548X (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Шугалій О. О. ORCID: 0000-0002-6587-0096 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## УЗАГАЛЬНЕНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗАСТОСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ ЗВ'ЯЗКУ ЗА ЦІЛЬОВИМ ПРИЗНАЧЕННЯМ

Забезпечення електронними комунікаційними послугами військових формувань, які захищають державу в умовах відбиття повномасштабного воєнного вторгнення рф, вимагає створення системи зв'язку (СЗ) Збройних Сил України (ЗС України), яка володіє необхідними властивостями щодо виконання поставлених завдань за призначенням [1; 2]. Згідно зі стандартом АJP-3 «Об'єднана доктрина ведення операцій НАТО» [3], нарощування бойових спроможностей об'єднаних сил та підтримка операцій (бойових дій) здійснюється в тому числі завдяки використанню супутникового зв'язку.

Потенційні можливості супутникового зв'язку, такі як ширококомовність, висока надійність та якість каналів зв'язку, незалежність від відстані, фізико-географічних умов та висока мобільність дозволяють забезпечити зв'язком абонентів системи електронних комунікацій збройних сил, яка є бойовою платформою, що дозволяє системі управління отримувати мережеві інформаційні послуги в реальному масштабі часу. Сучасні супутникові ретранслятори (СР) можуть мати до кількох десятків транспондерів кількох частотних діапазонів [4–6]. Супутникові системи зв'язку (ССЗ), що включають кілька СР, можуть забезпечити високу пропускну спроможність радіоканалів та можливість передачі ними великих обсягів інформації і дозволяють вирішити проблему створення глобальних інформаційно-телекомунікаційних систем та мереж.

Система супутникового зв'язку ЗС України повинна мати можливість зміни конфігурації для визначеного району обслуговування залежно від потреб у певних типах супутникових мереж, а отже ССЗ ЗС України має базуватися в тому числі на СР зв'язку комерційного призначення.

У статті запропонована узагальнена методика оцінки супутникових ретрансляторів зв'язку ССЗ ЗС України, новизною якої є її загальна спрямованість для ССЗ, що побудовані за різними архітектурними принципами, використовують різні частотно-орбітальні ресурси та надають різні послуги із застосуванням методологічного підходу, який базується на положеннях кваліметрії та розрахунку інтегрального та відносного показників ефективності, що враховує характерні показники окремих СР.

**Ключові слова:** супутниковий зв'язок, супутниковий ретранслятор, критерій ефективність.

**L. Bondarenko, M. Masesov, I. Kovalenko, V. Rudenko, O. Shugaliy Generalized methodology of valuate using the satellite repeater connection for targeted purpose.**

Providing electronic communication services to military formations that protect the state in the conditions of repelling a full-scale military invasion of the Russian Federation, requires the creation of a communication system (SZ) of the Armed Forces (AF) of Ukraine, which has the necessary properties to perform the assigned tasks as intended [1; 2]. According to the standard AJP-3 «Joint doctrine of the conduct of NATO operations» [3], increasing the combat capabilities of the combined forces and supporting operations (combat operations) is carried out, including through the use of satellite communications.

The potential capabilities of satellite communication, such as broadcasting, high reliability and quality of communication channels, independence from distance, physical and geographical conditions, and high mobility, allow to ensure the communication of subscribers of the electronic communications system of the armed forces, which is a combat platform that allows the system management to receive network information services in real time. Modern satellite repeaters (SR) can have up to several dozen transponders of several frequency bands [4–6]. Satellite communication systems, which include several SRs, can provide high bandwidth of radio channels and the possibility of transmitting large volumes of information through them and allow solving the problem of creating global information and telecommunication systems and networks.

The satellite communication system of the AF of Ukraine should be able to change the configuration for a specific service area depending on the needs of certain types of satellite networks, and therefore the satellite communication system of the AF of Ukraine should be based, including on SR communication of commercial appointment.

The article proposes a generalized methodology for evaluating satellite communication relays of the SSR of the AF of Ukraine, the novelty of which is its general orientation for satellite communication systems built according to different architectural principles, using different frequency-orbital resources and providing different services using a

*methodological approach, which is based on the provisions of qualimetry and the calculation of integral and relative efficiency indicators, which takes into account the characteristic indicators of individual satellite repeaters.*

**Keywords:** *satellite communication, satellite repeaters, efficiency criteria.*

### **Постановка завдання в загальному вигляді**

Планування електронних комунікацій в системі планування операції (бою) є найбільш складним, трудомістким та відповідальним періодом діяльності посадових осіб органів управління зв'язком, спрямованим на вироблення обґрунтованих рішень щодо організації зв'язку та розроблення відповідних документів.

Супутниковий зв'язок – це радіозв'язок, що здійснюється між земними станціями за допомогою ретрансляції радіосигналів через СР [1; 2], основними перевагами якого, порівняно з іншими родами зв'язку, є:

значне розширення території, в межах якої можливий зв'язок між абонентами, та одночасне використання ними СР;

висока пропускна спроможність радіоканалів супутникового зв'язку і можливість передачі по них великих обсягів інформації;

можливість забезпечення зв'язком важкодоступних та віддалених районів за практичної незалежності вартості супутникового каналу від відстані між абонентами.

Система супутникового зв'язку ЗС України являє собою складну цілеспрямовану технічну систему, що складається з сукупності елементів (різної природи), які знаходяться у відносинах та зв'язках один з одним [6; 7]. Оскільки ССЗ призначена для надання послуг електронних комунікацій кінцевим споживачам із заданою якістю, то планування застосування системи має проводитися при комплексному обліку різних за своєю природою факторів, різноманіття відносин та зв'язків між ними, зовнішніх умов тощо, які впливають на показники якості послуг.

Оцінка ССЗ проводиться з метою вирішення наступних завдань:

прийняття рішення щодо допустимості практичного використання способу дій, що оцінюється, у тій чи іншій ситуації;

виявлення вкладів (ефектів) різних факторів у загальну ефективність ССЗ, впливу взаємодій факторів на ефективність;

визначення шляхів підвищення ефективності ССЗ (виявлення резервів ефективності);

визначення функціональних можливостей технічних засобів, що використовуються;

зіставлення (порівняння) кількох альтернативних варіантів дій або технічних засобів, їх ранжування за рівнями ефективності (встановлення відношення переваги на множині можливих варіантів).

Методологічною основою підготовки та обґрунтування рішень при вирішенні проблем технічного характеру є системний аналіз. Прийоми та методи системного аналізу спрямовані на висування альтернативних варіантів вирішення проблеми, виявлення масштабів невизначеності (невідповідності) щодо кожного варіанту та зіставлення варіантів щодо їхньої ефективності.

Планування побудови ССЗ, яка задовольняє заданим показникам якості, повинні ґрунтуватися на методах порівняння показників ефективності за обраними, обґрунтованими критеріями.

**Актуальність викладеного матеріалу** полягає в тому, що відсутність єдиних підходів, а відтак і єдиних методів та методик оцінки ССЗ, з урахуванням особливостей її побудови, ускладнює, а часом і перешкоджає проведенню оперативних розрахунків під час планування побудови ефективної архітектури ССЗ ЗС України, яка задовольняє за показниками якості системи управління, на користь якої вона функціонуватиме. Вирішення зазначеної проблеми полягає в подальшому вивченні глибинної суті проблеми, її опису та формуванні пропозицій щодо методів та узагальненої методики вирішення цього актуального завдання.

### **Аналіз останніх публікацій**

Класичні роботи в області ССЗ, наприклад, [4–6; 8], присвячено побудові сучасних супутників зв'язку і земних станцій на основі досліджень взаємозалежності характеристик пропускної спроможності та завадостійкості ліній супутникового зв'язку, захисту ліній від зовнішніх і взаємних завад при багатостанційному доступі, розподілу енерго-просторових ресурсів у багатоствольних та багатопроменевих системах, орбітальної побудови багатосупутникових систем.

У зазначених роботах розгляд питань ефективності ССЗ проводиться з позицій техніко-економічної ефективності, вартісних функцій систем з урахуванням космічного сегмента, оптимізації вартості ліній супутникового зв'язку, питомих витрат за одиницю пропускної спроможності та питомої вартості обслуговування систем.

У монографії [6] пропонується та досліджується багаторівнева структурно-параметрична («статична») модель ССЗ як сукупності та взаємозалежності компонентів із множиною параметрів та показників, що підлягають оптимізації.

У статті [9] розглядається залежність стратегії розвитку супутникового зв'язку на основі нових технологій шляхом застосування багатопараметричних оцінок та інтегральних моделей ефективності. Сформовано систему приватних та узагальнюючих показників, розроблено модель інтегральної оцінки ефективності, процедуру експертного оцінювання складу, значущість окремих показників інтегральної моделі та безпосередню оцінку ефективності. Запропоновано оцінку достовірності вибору ефективних варіантів побудови ССЗ, що здійснюється на основі коефіцієнта узгодженості думок експертів.

У статті [10] пропонується методика оцінки ефективності ССЗ із СР на різних типах орбіт, яка зводить оцінку ефективності до розрахунку собівартості одиниці передачі інформації. Однак запропонований підхід не дозволяє порівняти ССЗ із СР на GEO-, LEO- та MEO-орбітах, параметри та послуги яких суттєво відрізняються.

У роботі [11] досліджуються питання оцінки та підвищення ефективності каналів зв'язку сучасних ССЗ, реалізованих на базі технології VSAT, з використанням технологій TDM/TDMA та комутацією пакетів з урахуванням особливостей Ка-діапазону. Запропоновано узагальнені методики та моделі для оцінки та вибору варіантів, що забезпечують підвищення техніко-економічної ефективності каналів у мережах зв'язку на базі сучасних технологій VSAT з урахуванням особливостей Ка-діапазону.

Таким чином, аналіз літератури та інтернет-ресурсів у галузі ССЗ [4–6; 9–11] показує, що нині відсутня загальна методика оцінки ефективності ССЗ, які побудовані за різними архітектурними принципами, використовують різні частотно-орбітальні ресурси та надають різні послуги.

### **Мета статті**

Метою статті є формування методологічного апарату оцінки ССЗ та розробка узагальненої методики оцінки застосування супутникових ретрансляторів зв'язку за цільовим призначенням в ССЗ ЗС України. Така методологія може використовуватися під час розробки вихідних даних при моделюванні процесів у ССЗ ЗС України на користь науково обґрунтованого вибору принципів організації мереж зв'язку у них.

Новизною представленої в роботі методики є її загальна спрямованість для ССЗ, що побудовані за різними архітектурними принципами, використовують різні частотно-орбітальні ресурси та надають різні послуги із застосуванням методологічного підходу, який базується на положеннях кваліметрії та розрахунку інтегрального та відносного показників ефективності, що враховує характерні показники СР ССЗ ЗС України.

### **Виклад основного матеріалу**

Ефективність ССЗ виступає як важлива категорія теорії та практики застосування системи за цільовим призначенням, що відображає результат прояву всієї сукупності факторів

та умов, які визначають хід і результат забезпечення зв'язку, а значить й організації управління [12]. Ефективність складних цілеспрямованих технічних систем, таких як ССЗ, визначається безліччю різних за своєю природою факторів. Під фактором розумітимемо рушійну силу будь-якого процесу (яви) чи умов, що впливає на той чи інший процес (явище) [7].

Ефективність функціонування ССЗ сприймається як міра узагальненої (інтегральної) властивості, характеризує рівень її відповідності своєму призначенню [7]. Ефективність відображає якість функціонування ССЗ у конкретних умовах обстановки та показує, наскільки успішно вирішуються (можуть вирішуватись) завдання надання встановленого набору послуг електронних комунікацій. Оцінка ефективності ССЗ може здійснюватися на різних етапах її синтезу (побудови) та функціонування.

Для оцінки цільової ефективності ССЗ визначимо алгоритм дій, який складається з:

- 1) визначення цілей та завдань оцінки ефективності;
- 2) вибору показників та визначення критеріїв ефективності;
- 3) вибору (побудови) моделей для розрахунку показників ефективності;
- 4) підготовки вихідних даних для розрахунку показників ефективності;
- 5) проведення розрахунків для оцінки ефективності, аналізу результатів розрахунків та прийняття рішення [7; 12].

При дослідженні цільової ефективності ССЗ виділимо три групи факторів, наведених на рисунку 1.



Рис. 1. Фактори функціонування ССЗ як технічної системи

Для оцінювання цільової ефективності ССЗ необхідно визначити склад початкових і вихідних даних, а також показників і критеріїв, за якими буде здійснюватися їхнє порівняння між собою.

Оцінку якості ССЗ з позицій виконання завдань за призначенням пропонується визначати за цільовими характеристиками СЗ, такими як [1; 2]:

- доступність;
- пропускна здатність;
- завадозахищеність;

- надійність;
- керованість.

Розглянемо найбільш значущі характеристики СР, визначимо показники та критерії їхньої ефективності, а також способи розрахунку.

**Показник доступності СР та критерій оцінювання його ефективності**

Доступність СР – здатність ретранслятора забезпечувати абонентам супутникової мережі зв'язку доступ до радіоресурсу за збереження призначених пріоритетів та способів встановлення зв'язку [6].

Одним із найбільш часто обчислюваних показників доступності СР є ймовірність санкціонованого доступу абонента незалежно від його розташування щодо СР. Очевидно, що ймовірність санкціонованого доступу залежить від взаємного розташування абонента супутникової мережі зв'язку та зони радіопокриття СР, що фактично визначається ймовірністю знаходження абонента в зоні обслуговування ретранслятора та залежить від виконання умови взаємної радіовидимості супутникового абонентського терміналу та СР. Взаємозв'язок зон покриття, обслуговування та радіовидимості СР показано на рисунку 2.

За наявності рухомих абонентів розрахунок показника доступності СР проводиться з урахуванням перетину зони радіопокриття та району розташування абонентів, а також часу знаходження терміналу абонентів у зоні взаємної радіовидимості [6].

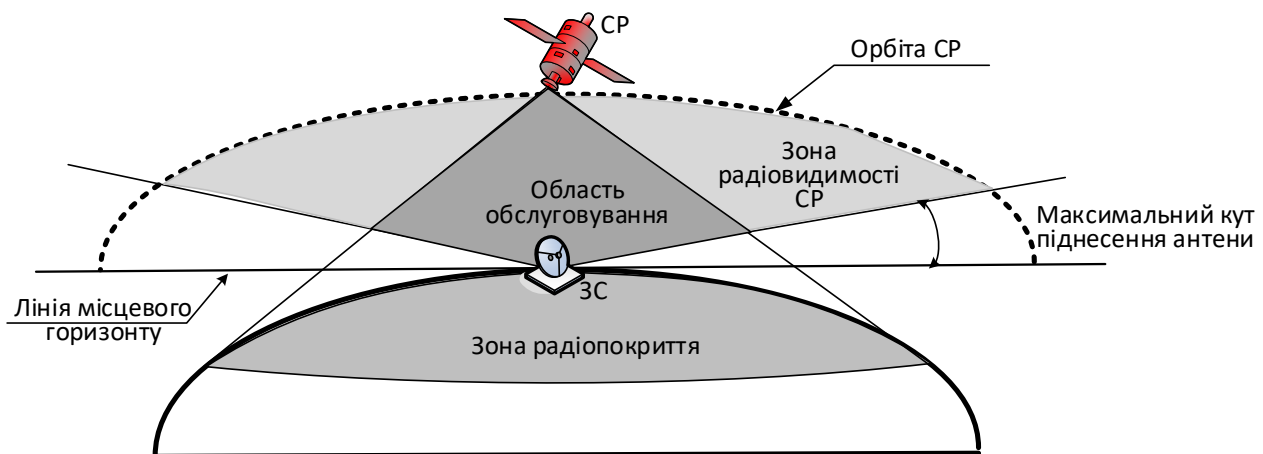


Рис. 2. Взаємозв'язок зон покриття, обслуговування та радіовидимості СР

Прийнявши припущення про те, що всі абоненти рівномірно розподілені по зоні їх розташування, розрахунок показника доступності СР ( $P_D$ ) виконується за формулою (1) [6]:

$$P_D = \frac{S_{\Pi} T_a}{S_a T_o}, \quad (1)$$

де  $P_D$  – показник доступності СР;

$S_{\Pi}$  – площа перетину району розташування абонентів із зоною радіопокриття СР;

$S_a$  – площа району розташування абонентів;

$T_a$  – період часу циклу обігу СР навколо Землі, коли абонент знаходиться в зоні радіопокриття СР;

$T_o$  – період часу обігу СР навколо Землі.

Очевидно, що окремим випадком при розміщенні СР на геостаціонарній орбіті відношення дорівнюватиме 1, тому що абоненти завжди знаходяться в одному і тому самому положенні щодо апарата. У разі, коли районів розташування абонентів декілька, розрахунок ведеться по перетині всіх районів, що розглядаються.

**Показник пропускної спроможності СР та критерій оцінювання ефективності**

Пропускна здатність СР – здатність ретранслятора, що визначає сукупний обсяг інформації, яка може передаватись і оброблятись в утворених ним радіоканалах, за одиницю часу і може бути кількісно оцінена матрицею пропускних здатностей напрямів зв'язку. У цьому випадку її прийнято розраховувати через сумарну кількість еквівалентних (стандартних) транспондерів у заданих діапазонах частот [6; 8]. В якості величини еквівалентного транспондера СР прийнята смуга частот, що дорівнює 36 МГц. У цьому випадку нормований показник пропускної спроможності СР ( $P_{ПС}$ ) обчислюється за формулою (2) [6; 8]:

$$P_{ПС} = \frac{\sum_{i=1}^d N_T C_T}{C_{ЕТ} N_{max}}, \quad (2)$$

де  $d$  – кількість діапазонів частот, в яких може функціонувати СР;

$N_T$  – кількість транспондерів СР у заданому діапазоні частот;

$C_T$  – смуга частот транспондерів СР у заданому діапазоні;

$C_{ЕТ}$  – смуга частот еквівалентного транспондера СР;

$N_{max}$  – максимальна кількість транспондерів СР в множині СР, що розглядається (або в орбітальному угрупованні).

**Показник завадостійкості СР та критерій оцінювання ефективності**

Завадостійкість СР – здатність ретранслятора виконувати завдання за призначенням в умовах впливу всіх видів завад [1; 2].

Виконати спрощене оцінювання завадостійкості СР можливо через порівняння сучасних стандартів супутникового зв'язку, що реалізуються в СР. Завадостійкість СЗ знаходиться в жорсткому співвідношенні зі швидкістю передачі інформації і безпосередньо пов'язана з питаннями оптимального використання спектрального ресурсу супутникового каналу. Сучасні стандарти супутникового зв'язку передбачають можливості адаптивної зміни балансу між завадостійкістю та швидкістю передачі інформації завдяки вибору сигнально-кодових конструкцій. У сучасних СР найчастіше застосовуються стандарти DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite), DVB-S/S2 (Digital Video Broadcasting – Sputnik), а також режим псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ) та використання фазоманіпульованих шумоподібних сигналів (ФМ ШПС), порівняння яких виконано в роботі [13]. При проведенні розрахунків повинні враховуватися можливості застосування інших способів забезпечення стійкості до завад: обробка сигналу на борту, використання багатопроменевих антен, управління променями антени, формування «нулів» діаграми спрямованості антени. Обчислення показника стійкості до завад СР проводиться за формулою, що дозволяє визначити співвідношення наявності та ефекту технологій забезпечення завадостійкості СР [6] за формулою (3):

$$P_{ЗС} = \sum_{i=1}^m K_i, \quad (3)$$

де  $m$  – кількість технологій, що впливають на завадостійкість СР;

$K_i$  – показник ефекту технологій забезпечення завадостійкості СР, який визначається експертно за таблицею 1 [13].

Таблиця 1

Технології забезпечення завадостійкості СР

| № з/п | Технології забезпечення завадостійкості | $K_i$ |
|-------|-----------------------------------------|-------|
| 1     | Стандарт DVB-S                          | 0,07  |
|       | Стандарти DVB-S2/ DVB-RCS               | 0,09  |
| 2     | Використання ФМ ШПС                     | 0,18  |
| 3     | Режим ППРЧ                              | 0,22  |

| № з/п | Технології забезпечення завадостійкості          | $K_i$ |
|-------|--------------------------------------------------|-------|
| 4     | Багатопроблемні антени                           | 0,10  |
| 5     | Режим обробки сигналів на борту                  | 0,14  |
| 6     | Управління променями антени                      | 0,11  |
| 7     | Формування «нулів» діаграми спрямованості антени | 0,16  |

### **Показник надійності СР та критерії оцінювання ефективності**

**Надійність** – здатність системи військового зв'язку та автоматизації виконувати завдання за призначенням, зберігаючи в часі значення експлуатаційних показників у межах, передбачених експлуатаційною документацією [1; 2].

СР належать до складних технічних систем, оскільки вони мають слабо передбачувану поведінку зі здатністю ухвалення рішення [7]. З метою досягнення заданого рівня надійності СР застосовують конструкторські рішення, що забезпечують відновлюваність виробу, наприклад: структурне, функціональне, алгоритмічне, часове та інформаційне резервування.

На етапі конструювання СР використовуються комплексні узагальнені показники надійності, які характеризують систему на всіх етапах її життєвого циклу.

Для оцінювання СР за показником надійності доцільно використовувати узагальнені комплексні показники [14]: коефіцієнт готовності ( $K_G$ ), коефіцієнт оперативної готовності ( $K_{OG}$ ), коефіцієнт технічного використання ( $K_{ТВ}$ ), виходячи з яких розраховується підсумковий показник надійності. Розрахунок узагальненого показника надійності пропонується проводити за такою формулою (4) [14]:

$$P_H = K_G * K_{OG} * K_{ТВ}, \quad (4)$$

Значення комплексних показників конкретного типу СР задаються у тактико-технічному завданні на проектування та містяться у технічних умовах на виріб. Зазвичай значення зазначених характеристик варіюється в межах 0,9÷0,995.

### **Показник керованості СР та критерії оцінювання ефективності**

Під керованістю розуміють здатність системи переходити за кінцевий (заданий) час з одного стану в інший (необхідний) під дією керуючих впливів [7].

У загальному сенсі керованість є здатністю системи виконувати команди управління та оперативно реагувати на них. Очевидно, керувати можна лише завадостійкою системою. Якщо сигнали керування спотворюються в недопустимих межах при їх передачі до об'єктів управління, то управління позбавляється сенсу. Керованість забезпечується насамперед наявністю прямого та зворотного зв'язків, які служать для передачі до керованої системи команд (сигналів) управління, отримання від неї повідомлень про неузгодженість реального (фактичного) і необхідного станів керованого об'єкта та виконання команд управління. Керованість поєднує такі властивості системи, як гнучкість управління, його оперативність, точність, швидкодію, інерційність та ін. Для складних систем керованість включає також здатність вироблення рішень, на основі яких формуються керуючі дії [7].

На взаємодію бортової системи управління СР із наземним автоматизованим комплексом управління та цільовою бортовою апаратурою зв'язку чималий вплив має тип орбіти. Збільшення відстані від наземного автоматизованого комплексу управління до СР тягне за собою погіршення якості радіосигналу в прямому та зворотному напрямку (на лінії «вгору» і на лінії «вниз»), що веде до затримок в управлінні, зменшення швидкості передачі інформації, отже, і до зниження обсягів телеметричної інформації від цільової бортової апаратури [6].

Оперативне, наближене оцінювання керованості ( $P_K$ ) СР визначається типом орбіти за умови відсутності впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів штучного походження. Складність розрахунку цього показника в режимі масштабу часу, наближеного до реального,

визначає вибір на користь експертного способу оцінювання [9]. У таблиці 2, створеній виходячи з аналізу публікацій [4; 6; 9], представлено показники керованості СР залежно від типу орбіти [10].

Таблиця 2

Взаємозв'язок показника керованості СР та типу його орбіти

| № з/п | Тип орбіти СР   | $P_y$ |
|-------|-----------------|-------|
| 1     | Низька кругова  | 1,00  |
| 2     | Середня кругова | 0,95  |
| 3     | Геостаціонарна  | 0,90  |
| 4     | Високоеліптична | 0,85  |

### Розрахунок показника цільової ефективності СР

Перелічені вище показники ефективності застосування СР дозволяють всебічно дослідити ефективність використання СР, а саме з погляду доступності –  $P_D$ , пропускної спроможності –  $P_{ПС}$ , завадостійкості –  $P_{ЗС}$ , надійності –  $P_H$  та керованості –  $P_K$ . Тож постає актуальною задача визначення узагальненого показника цільової ефективності СР.

У спрощеному вигляді для узагальнення отриманих характеристичних показників СР можна використовувати розрахунок узагальнюючого інтегрального показника цільової ефективності СР за формулою (5):

$$P_i = (P_D * P_{ПС} * P_{ЗС} * P_H * P_K)_i, \quad (5)$$

де  $i$  – умовний порядковий номер СР у множини оцінюваних або у складі аналізованого орбітального угруповання (ОУ). У загальному випадку оцінюваний СР може і не належати до складу ОУ.

Для врахування ваги окремих показників ефективності необхідно застосувати відповідні вагові коефіцієнти згідно з виразом (6):

$$P_i = (P_D * q_D + P_{ПС} * q_{ПС} + P_{ЗС} * q_{ЗС} + P_H * q_H + P_K * q_K)_i, \quad (6)$$

$$q_D + q_{ПС} + q_{ЗС} + q_H + q_K = 1,$$

де  $q_D, q_{ПС}, q_{ЗС}, q_H, q_K$  – вагові коефіцієнти відповідних показників ефективності.

Зазвичай, для визначення вагових коефіцієнтів найчастіше використовують методи експертних оцінок (експертний метод), метод використання показника варіації (варіаційний метод) та метод визначення закону розподілу [15]. Останні два можуть застосовуватися при наявності певної кількісної, статистичної інформації. У випадку, коли статистична інформація про досліджувані показники відсутня або її не можна кількісно виразити, використовується метод експертних оцінок.

Для визначення вагових коефіцієнтів пропонується використовувати метод експертних оцінок, який полягає в обробці інформації, отриманої шляхом опитування експертів. Використання експертів як джерел інформації про майбутній розвиток досліджуваного процесу (явища, об'єкта) ґрунтується на гіпотезі наявності у провідних спеціалістів визначеної галузі глибоких і достатніх знань про шляхи розв'язання досліджуваних проблем [16].

В основі більшості застосовуваних на практиці методів лежить опитування експертів з математичною обробкою їхніх суджень. Найчастіше використовують такі математичні методи [17]:

*Пряма розстановка.* Експертам пропонується розставити коефіцієнти  $k_i$  при відповідних факторах, виходячи з умови  $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ , тобто розв'язати задачу безпосередньо.

*Ранжування факторів.* Ранжування дозволяє упорядкувати фактори за ступенем збільшення або зменшення їхнього впливу на досліджуваний феномен, що цікавить дослідника. Результати ранжування  $n$  факторів  $m$  експертів можна представити у вигляді матриці:



$$\begin{matrix} X_{11}, X_{21}, \dots, X_{n1} \\ X_{12}, X_{22}, \dots, X_{n2} \\ \dots, \dots, \dots, \dots \\ X_{1m}, X_{2m}, \dots, X_{nm}. \end{matrix}$$

Зведені оцінки вагових коефіцієнтів можна отримати в результаті усереднення приватних рангів.

*Парне порівняння.* В цьому методі експертам пропонується порівняти фактори попарно. Інформація від кожного експерта надходить у формі булевої матриці парних порівнянь:

$$y_i = (y_{ik,j}),$$

де  $i, k = 1, \dots, n$  – фактори (показники), що порівнюються;  $j = 1, \dots, m$  – експерт, що виконує порівняння;  $y_{ik,j}$  – результат парного порівняння  $j$ -м експертом факторів  $X_i$  і  $X_k$  може виражатися одиницею або нулем із наступного правила.

Якщо експерт порівнює фактори між собою, то 1, якщо на думку  $j$ -го експерта параметр  $X_i$  впливає сильніше ніж  $X_k$ , в іншому випадку 0.

Проаналізувавши різні методи експертних оцінок, для визначення вагових коефіцієнтів узагальненого показника цільової ефективності СР доцільно використовувати метод аналітичних записок, який дозволяє мінімізувати кількість експертів, а за математичний апарат – методи прямої розстановки і ранжування, які дозволяють врахувати помилки в оцінках експертів на основі застосування довірчого інтервалу.

Безпосередньо процес експертизи можна розбити на декілька етапів, згідно з методами, розглянутими в [17]:

1. Визначення придатності і компетентності експертів.
2. Проведення опитування.
3. Обробка результатів опитування.
4. Визначення узгодженості думки експертів.

На першому етапі кожному експерту виставляють за певним набором критеріїв деяку оцінку за бальною шкалою. Такими критеріями можуть бути, наприклад, фах за освітою з точки зору галузі дослідження, рівень освіти, загальний стаж роботи в галузі, стаж роботи в досліджуваному питанні, досвід участі в подібних експертизах, рівень ознайомленості з методиками дослідження тощо.

Для визначення компетентності на основі складається анкета, згідно з якою експерти особисто собі виставляють оцінки. Ступінь придатності спеціаліста до експертизи по анкетному опитуванню визначається за коефіцієнтом компетентності за виразом (7):

$$K_a = \frac{\sum V_{ij}}{\sum V_j}, \quad (7)$$

де  $K_a$  – коефіцієнт компетентності за анкетним опитуванням;

$V_{ij}$  – вага  $j$ -ї градації (обраної експертом, що оцінюється)  $i$ -ї характеристики, в балах;

$V_j$  – максимальна вага  $j$ -ї характеристики, в балах [16].

Сформована робоча група експертів є компетентною і здатною кваліфіковано вирішувати поставлені перед нею завдання за такої умови:

$$0,67 \leq M \leq 1,$$

де  $M$  – рівень компетентності експертної групи, що визначається формулою (8):

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (8)$$

де  $n$  – кількість експертів в групі.

Для визначення вагових коефіцієнтів методом ранжування [16] необхідно присвоїти кожному рангу певну кількість балів за умови, що перший ранг отримує найбільшу кількість балів, а останній – найменшу. Далі необхідно визначити суму балів по кожному критерию:

$$r_i = \sum_{m=1}^n r_{mi},$$

де  $r_i$  – сума балів по  $i$ -му критерию;

$r_{mi}$  – кількість балів по  $i$ -му критерию від  $n$ -го експерта.

Безпосередньо розрахунок коефіцієнтів виконується за формулою (9):

$$k_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i}. \quad (9)$$

Окремо проводиться оцінку ступеня узгодженості експертів для перевірки отриманих результатів.

Таким чином, за допомогою отриманих вагових коефіцієнтів та формули (5) можна отримати значення для узагальненого показника цільової ефективності для окремого СР.

Для зручності оцінки доцільно використовувати відносний показник цільової ефективності, який набуває значень у діапазоні  $W_i \in [0;1]$  і може бути розрахований на основі узагальненого показника за формулою (10):

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (10)$$

де  $W_i$  – відносний показник цільової ефективності  $i$ -го СР з множини оцінюваних;

$i$  – умовний порядковий номер СР у багатьох оцінюваних  $i = \overline{1, n}$ ;

$P_i$  – значення інтегрованого показника цільової ефективності  $i$ -го СР,  $P_i \in [0;1]$ .

На практиці також зручно використовувати нормований показник цільової ефективності СР  $P_{i \text{ норм}}$ , який пропонується розраховувати за формулою (11):

$$P_{i \text{ норм}} = P_i / P_{\text{max}} \quad (11)$$

де  $P_{i \text{ норм}}$  – нормоване значення інтегрованого показника цільової ефективності  $i$ -го СР,  $P_i \in [0;1]$ ;

$P_{\text{max}}$  – максимальне значення інтегрованого показника цільової ефективності СР, що входить до складу ОУ, відносно якого буде здійснено порівняння інших ретрансляторів.

Нормований показник ефективності відображає, наскільки застосування оцінюваного СР відповідає цільовому призначенню щодо еталонного (найкращого) апарату, що входить до складу аналізованого орбітального угруповання.

Порівняння отриманих нормованих показників ефективності окремих СР дасть змогу проводити оцінку, вибір та побудову складових ССЗ, в тому числі перспективних супутників зв'язку України. Це дозволить побудувати найбільш ефективну ССЗ ЗС України.

### Висновки

Супутникова система зв'язку ЗС України, що може включати кілька СР, в тому числі і комерційного призначення, може забезпечити високу пропускну спроможність радіоканалів та можливість передачі ними великих обсягів інформації і дозволяє вирішити проблему створення глобальних інформаційно-телекомунікаційних систем та мереж. При цьому постає задача розробки єдиних методів та методик оцінки ССЗ ЗС України, з урахуванням особливостей її побудови. Це дозволить проведення оперативних розрахунків під час планування побудови ефективної архітектури ССЗ ЗС України, яка повинна задовольняти за показниками якості системи управління, на користь якої вона функціонуватиме.

У статті вирішується актуальне наукове завдання – формування методологічного апарату оцінки ССЗ та розробка узагальненої методики оцінки застосування супутникових ретрансляторів зв'язку за цільовим призначенням в ССЗ ЗС України. Зазначена методологія може використовуватися під час розробки вихідних даних при моделюванні процесів у ССЗ

ЗС України на користь науково обґрунтованого вибору принципів організації мереж зв'язку у них.

Запропонована узагальнена методика оцінки супутникових ретрансляторів зв'язку ССЗ ЗС України, новизною якої є її загальна спрямованість для ССЗ, що побудовані за різними архітектурними принципами, використовують різні частотно-орбітальні ресурси та надають різні послуги з застосуванням методологічного підходу, який базується на положеннях кваліметрії та розрахунку інтегрального та відносного показників ефективності, що враховує характерні показники окремих СР. В якості основних характеристик, що підлягають оцінюванню, запропоновано вибрати доступність, пропускну здатність, завадостійкість, надійність і керованість супутникових ретрансляторів, на основі яких розраховується узагальнена інтегральна та нормована оцінка.

Представлена в роботі узагальнена методика буде корисною фахівцям для обґрунтування нових технологічних рішень при розробці вітчизняних ССЗ в інтересах ЗС України. Крім того, методологія буде корисна науковцям та здобувачам, які ведуть наукові дослідження в галузі супутникового зв'язку та під час розробки вимог до перспективних супутників зв'язку України.

#### **Напрямки подальших досліджень**

У подальших дослідженнях пропонується деталізувати розрахунки для окремих показників ефективності застосування ССЗ, розробити відповідні методики та провести розрахунки оцінки ефективності застосування для ССЗ, які можливо бути використувати у Збройних Силах та інших силах оборони України.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. ДСТУ В3265 – 95. Зв'язок військовий. Терміни та визначення. [Чинний від 1997-01-01]. Державний стандарт України. 23 с.
2. Військова система стандартизації. Військовий стандарт 01.112.001. Військовий зв'язок. Терміни та визначення. К.: Міністерство оборони України, 2006. 25 с. Реєстраційний номер А2187/000020.
3. NATO STANDARD AJP-3 ALLIED JOINT DOCTRINE FOR THE CONDUCT OF OPERATIONS. Edition C Version 1, 2019 // NATO MILMED COE. URL: [https://www.coemed.org/files/stanags/01\\_AJP/AJP-3\\_EDC\\_V1\\_E\\_2490.pdf](https://www.coemed.org/files/stanags/01_AJP/AJP-3_EDC_V1_E_2490.pdf).
4. Ільченко М. Ю., Наритник Т. М., Присяжний В. І., Капштик С. В., Матвієнко С. А. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника // Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 4 (125). С. 57–85. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2020.04.057>.
5. Ніколаєнко Б. А., Пелешок Є. В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
6. Конин В. В. Спутниковые системы связи, навигации, наблюдения. К.: Кафедра АНС, 2007. 350 с.
7. Васілевський О., Ігнатенко О. Нормування показників надійності технічних засобів: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 160 с.
8. Беркман Л. Н., Стеглов В. К., Кільчицький Є. В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. Київ: Техніка, 2004. 576 с.
9. Фролов В. Ф., Кирпач Л. А., Ільїн О. Ю. Використання узагальнених критеріїв при проектуванні супутникових систем // Зв'язок. 2018. № 1. С. 9–11.
10. Кирпач Л. А., Власенко Г. М., Срібна І. М. Методи оцінювання критеріїв ефективності супутникових систем // Зв'язок. 2018. № 4. URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/2114-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-7478-1-10-20190513.pdf>.
11. Галаган В. І., Турейчук А. М., Бондарчук С. В., Прокопенко О. С., Панадій К. В. Розгляд проблемних питань оптимізації супутникового зв'язку // Збірник наукових праць Центру воєнно-

стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського. 2015. № 2. С. 30–37. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znrcvdsd\\_2015\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znrcvdsd_2015_2_7).

12. Zinchenko A. Методичний підхід з оцінки ефективності системи зв'язку спеціального призначення / А. Zinchenko, R. Pikul, K. Zinchenko, K. Liubarchuk, E. Yusukhno, A. Maksymenko, Yu. Sokol, Yu. Rindin // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 1 (59). С. 132–136. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.132>.

13. Шульга О., Сокіріна В. Вимірювання завадостійкості супутникових радіонавігаційних систем методом теорії ігор в умовах невизначних завад // Measuring And Computing Devices In Technological Processes. № 4. С. 142–148. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-20>.

14. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. К., 1995. 75 с.

15. Гуляр Р. Е. Методи визначення вагових коефіцієнтів при розрахунку таксономічних показників / Р. Е. Гуляр // Харківська національна академія міського господарства. 3 с. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/29737/1/44.pdf>.

16. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання: монографія / Б. Є. Грабовецький. Вінниця: ВНТУ, 2010. 171 с.

17. Сахно В. П. До аналізу методів визначення періодичності виконання технічних впливів / В. П. Сахно, О. М. Іванушко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»: науково-технічний збірник. К.: НТУ, 2017. Вип. 3 (39). С. 53–65.