

УДК 621.39

канд. техн. наук Коваленко І. Г. ORCID: 0000-0002-6827-5196 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

д-р філософії Зарубенко А. О. ORCID: 0000-0002-7616-6416 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

канд. техн. наук, ст. наук. співроб. Масесов М. О. ORCID: 0000-0003-4537-4295

(ВІТІ ім. Героїв Крут)

Драглюк О. В. ORCID: 0000-0001-8572-7257 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ЗА СТАНДАРТАМИ НАТО З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У сучасних умовах ведення бойових дій, що характеризуються активним застосуванням противником засобів радіоелектронної боротьби, високоточних засобів ураження та кіберзасобів, побудова ефективної системи військового зв'язку стає критичним фактором забезпечення управління військами. Гармонізація національних доктринальних і керівних документів за стандартами НАТО вимагає удосконалення формалізованого підходу до кількісного оцінювання ефективності систем зв'язку (СЗ), який одночасно враховує різноманітні суперечливі вимоги до системи, а також різноманітні зовнішні та внутрішні фактори, що впливають на функціонування системи.

Аналіз наявних методик і програмних засобів показав, що вони мають обмежені функціональні можливості та дозволяють здійснювати окремі інженерні розрахунки. Водночас, відомий науково-методичний апарат комплексного оцінювання ефективності СЗ за критеріями постійної готовності, стійкості, мобільності, пропускної спроможності та розвідзахищеності у формулюванні задачі багатокритеріальної оптимізації не враховує можливості використання актуальної геопросторової інформації.

У статті запропоновано удосконалену методику комплексної оцінки ефективності СЗ за стандартами НАТО, що формалізує задачу оцінювання як задачу багатокритеріальної оптимізації на Парето-множині з адитивною згортокою п'яти часткових показників. Особливістю методики, що визначає сутність її наукової новизни, є врахування та інтеграція геопросторового аналізу на основі графового моделювання інформаційних напрямків із використанням стандартів НАТО. Наведено математичний апарат нормалізації, агрегації та візуалізації результатів розрахунку за розробленою методикою. Практичною цінністю результатів досліджень є реалізація методики у вигляді програмного модуля, що пропонується для використання органами військового управління в процесі побудови системи зв'язку тактичної та оперативної ланок управління.

**Ключові слова:** система зв'язку, ефективність, стандарти НАТО, багатокритеріальна оптимізація, Парето-оптимальність, геопросторова інформація, радіоелектронна боротьба.

### *I. Kovalenko, A. Zarubenko, M. Masesov, O. Drahliuk. Methodology for assessing the effectiveness of communication system according to NATO standards using geospatial information*

*In modern combat operations, characterized by active use of electronic warfare (EW) means, high-precision fires, and cyber threats, the effective design of the communication system (CS) of a military formation becomes a critical factor in preserving command and control of troops. Harmonization of the national Manual on Communications of the Armed Forces of Ukraine (DDP 6-26.22) with NATO standards (AJP-6, SAS-026 COBP, STANREC 4174) requires a formalized approach to the quantitative assessment of CS effectiveness that simultaneously takes into account the physical characteristics of radio means, terrain relief, the location of enemy threats, and the hierarchy of information exchange routes.*

*An analysis of existing methodologies and software tools (Radio Mobile, Radio Planner, ATOLL) showed that they allow performing individual radio-technical calculations but do not provide a comprehensive assessment of CS effectiveness according to the criteria of operational readiness, survivability, mobility, throughput, and LPI/LPD protection in the formulation of a multi-criteria optimization problem accounting for geospatial information.*

*The article proposes a methodology for the comprehensive assessment of CS effectiveness according to NATO standards, which formalizes the assessment problem as a multi-criteria optimization problem on the Pareto set with additive convolution of five partial indicators. A distinctive feature of the methodology is the integration of radio-technical calculations (Link Budget, ITU-R P.526 based on SRTM data, ITU-R P.676) with geospatial analysis (radio coverage zones, fire-strike zones, EW zones, reconnaissance zones) and graph modeling of information exchange routes. The mathematical apparatus of normalization, aggregation, and visualization of results is described. The proposed methodology is implemented as a software module and is suitable for operational assessment of CS design alternatives at brigade, corps, and operational command levels.*

**Keywords:** communication system, effectiveness, NATO standards, multi-criteria optimization, Pareto optimality, geospatial information, electronic warfare.

**Постановка завдання.** Сучасний збройний конфлікт визначається активним застосуванням противником засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), розвідки, високоточних засобів ураження та кіберзасобів. Забезпечення своєчасності, достовірності та безпеки зв'язку у таких умовах є визначальним чинником забезпечення безперервності управління військами. Розроблена та затверджена у 2025 році Настанова зі зв'язку Збройних Сил України ДДП 6-26.22 [1] визначає п'ять основних вимог до СЗ, що визначають ефективність її функціонування – постійну готовність  $R_{ПГ}$ , стійкість  $P_C$ , мобільність  $T_M$ , пропускну спроможність  $C$  та розвідзахищеність  $K_{PЗ}$ . Одночасно процес євроатлантичної інтеграції вимагає узгодження національної доктрини зі стандартами НАТО (АJP-6 [2], SAS-026 COBR [3], STANREC 4174 [4], STANAG 4677), у яких оцінювання проводиться через показники ефективності (Measures of Effectiveness, MoE) та показники продуктивності (Measures of Performance, MoP).

Наукове завдання досліджень обґрунтовується відсутністю формалізованої, математично коректної та програмно реалізованої методики, яка:

- 1) одночасно враховує вимоги до СЗ згідно з ДДП 6-26.22 (п'ять показників) та концепцію NATO MoE/MoP;
- 2) явно моделює задачу вибору варіанту побудови СЗ як задачу багатокритеріальної оптимізації;
- 3) інтегрує геопросторову інформацію (цифрова модель рельєфу SRTM, координати вузлів, зони загроз противника) у розрахунок часткових показників;
- 4) забезпечує відтворюваність результату та його візуалізацію для осіб, що приймають рішення (ОПР).

**Аналіз публікацій за темою дослідження.** Питання оцінювання ефективності систем військового зв'язку досліджувалися у працях [5–9].

У роботі [5] побудовано методику розрахунку інтервалів радіорелейного зв'язку з урахуванням рельєфу та будівель за рівнянням радіолінії та рекомендаціями ITU-R P.526, P.530, P.676. У монографії [6] систематизовано принципи побудови військових цифрових систем зв'язку, проте комплексна оцінка ефективності розглядається переважно якісно.

У [7] розглянуто питання завадозахищеності систем із ППРЧ/DSSS через Processing Gain та Jamming Margin, які не відповідають визначеним в ДДП 6-26.22 [1] показникам.

Закордонні роботи [8; 9] у рамках програми COBR for C2 Assessment пропонують концептуальний апарат MoE/MoP, який формалізується через дерево цілей і не містить готових розрахункових процедур.

Серед спеціалізованих програмних засобів найбільш відомі Radio Mobile, Radio Planner, CRC-COVWEB [5], ATOLL, які забезпечують моделювання електромагнітного поля та побудову зон радіопокриття за моделями Longley-Rice, ITU-R P.1546, P.526, P.1812. Проте такі засоби не оперують поняттями “вузол зв'язку”, “інформаційний напрямок”, “стійкість мережі” та не виконують інтегральну оцінку ефективності СЗ. Напрацювання в частині задач багатокритеріальної оптимізації [10] пропонують апарат Парето-оптимальності, але без прив'язки до специфіки оцінювання військових СЗ.

За результатами проведеного аналізу публікацій визначено, що наявні роботи не вирішують задачу комплексного оцінювання ефективності СЗ за всіма показниками ефективності з одночасним використанням геопросторової інформації та стандартів НАТО.

**Мета статті.** Провести аналіз існуючих методик оцінки ефективності систем зв'язку військового призначення НАТО та розробити (удосконалити) методику оцінки ефективності СЗ Збройних Сил України, яка буде застосовувати підходи НАТО щодо використання технічних і геопросторових даних відносно елементів СЗ та відповідати вимогам до СЗ Настанови зі зв'язку ДДП 6-26.22.

### Виклад основного матеріалу

#### 1. Математична модель СЗ

Для формування математичної моделі СЗ, що адекватно та достатньо повно відображає структуру, параметри та особливості функціонування системи, використано концептуальний підхід, основи якого наведені у [11], при цьому виділено наступні ієрархічні об'єкти СЗ згідно з виразом (1):

$$СЗ = \langle ЕЗ, ЛЗ, ІН, ВЗ, МЗ, СЗ \rangle, \quad (1)$$

де ЕЗ – множина елементів (засобів) зв'язку (СЕ); ЛЗ – множина ліній зв'язку (CL) як впорядкованих пар елементів; ІН – множина інформаційних напрямків (IER); ВЗ – множина вузлів зв'язку (CN); МЗ – множина мереж зв'язку; СЗ – система зв'язку, що моделюється, загалом.

Кожному вузлу  $vz \in ВЗ$  поставлено у відповідність геопросторову прив'язку згідно з виразом (2):

$$geo(vz) = (\varphi_{vz}, \lambda_{vz}, h_{vz}) \in WGS-84, \quad (2)$$

де  $\varphi_{vz}, \lambda_{vz}$  – широта та довгота;  $h_{vz}$  – висота підняття антени (м). Тип, ешелон та функціональне призначення вузла кодуються згідно з MIL-STD-2525D у форматі 20-символьного SIDC-коду (Symbol Identification Code).

Множина загроз противника  $T = T_F \cup T_{EW} \cup T_R \cup T_C$  розрізняє чотири класи – вогневі ( $T_F$ ), РЕБ ( $T_{EW}$ ), розвідки ( $T_R$ ) та кіберзагрози ( $T_C$ ). Кожна загроза  $t \in T$  має геопросторову прив'язку  $geo(t)$  та зону дії  $D_t$ , що обчислюється на етапі геопросторового аналізу.

## 2. Формалізація задачі оцінювання

Нехай  $X$  – варіант побудови СЗ, поданий набором параметрів відповідно до виразу (3):

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (3)$$

де  $x_i$  включає тактико-технічні характеристики (ТТХ) засобів (потужність передавача, чутливість приймача, смуга, модуляція, коефіцієнт підсилення антени), координати вузлів, склад обладнання, параметри каналів та структуру інформаційних напрямків.

Відповідно до ДДП 6-26.22 [1] задано п'ять цільових функцій (вираз (4)), які узгоджуються з вимогами НАТО МоЕ/МоР [2; 3]:

$$\begin{aligned} f_1(X) &= R_{ПГ}(X) \rightarrow \max, \\ f_2(X) &= P_C(X) \rightarrow \max, \\ f_3(X) &= T_M(X) \rightarrow \min, \\ f_4(X) &= C(X) \rightarrow \max, \\ f_5(X) &= K_{PЗ}(X) \rightarrow \max, \end{aligned} \quad (4)$$

за обмеженням на сумарну вартість  $V(X) \leq V_3$ , заданим особою, що приймає рішення. Задача (4) записується у векторному вигляді (5):

$$X^0: \begin{cases} f(X) = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) \rightarrow \text{opt}, \\ V(X) \leq V_3, \end{cases} \quad (5)$$

де  $R_{ПГ}$  – постійна готовність;  $P_C$  – стійкість;  $T_M$  – мобільність;  $C$  – пропускна спроможність;  $K_{PЗ}$  – розвідзахищеність, знак “opt” визначає оптимізацію у різних напрямках:  $f_1, f_2, f_4, f_5 \rightarrow \max, f_3 \rightarrow \min$ .

Часткові показники (4) є суперечливими: покращення одного призводить до погіршення іншого (наприклад, резервування ліній підвищує  $P_C$ , але погіршує  $T_M$  і  $V$ ; обмеження випромінювання підвищує  $K_{PЗ}$ , але знижує  $C$ ). З урахуванням зазначеного, задача (5) є задачею векторної оптимізації, розв'язок якої пропонується шукати у класі Парето-оптимальних варіантів [10].

**Визначення 1.** Варіант  $X^a$  домінує варіант  $X^b$  (записується  $X^a > X^b$ ), якщо

$$\forall i \in \{1,2,4,5\}: f_i(X^a) \geq f_i(X^b), \quad f_3(X^a) \leq f_3(X^b), \quad \exists j: f_j(X^a) \neq f_j(X^b). \quad (6)$$

**Визначення 2.** Множина  $D_P \subseteq D$  називається Парето-оптимальною множиною (Парето-множиною), якщо вона складається з усіх недомінованих варіантів допустимої множини  $D$ :

$$D_P = \{X^* \in D: \nexists X \in D, X \succ X^*\}. \quad (7)$$

Для обрання єдиного варіанту з Парето-множини  $D_P$  використано адитивну згортку з нормалізованими частковими показниками [10; 12]:

$$Z(X) = \sum_{i=1}^5 a_i \cdot f_i^{norm}(X), \quad \sum_{i=1}^5 a_i = 1, \quad a_i \in [0,1], \quad (8)$$

де  $a_i$  – вагові коефіцієнти, що адаптивно визначаються методом аналітичної ієрархії (АНР) Сааті [12] залежно від типу бойових дій (наступ, оборона, стабілізаційні дії, тощо) та ешелону управління. Для оборони, наприклад, рекомендується  $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$  – максимальний акцент на стійкості та готовності при мінімізації ваги мобільності.

### 3. Розрахунок часткових показників

#### 3.1. Постійна готовність $R_{ПГ}$

Показник  $R_{ПГ}$  агрегує три коефіцієнти – укомплектованість особовим складом  $K_{ОС}$ , справність техніки  $K_{ТЕХ}$  та оперативну готовність  $K_{ГОТ}$ :

$$R_{ПГ}(X) = w_{ос} \cdot K_{ОС} + w_{тех} \cdot K_{ТЕХ} + w_{гот} \cdot K_{ГОТ}. \quad (9)$$

Укомплектованість за особовим складом і технікою обчислюється як середня частка за вузлами, а оперативна готовність – через доступність ліній та напрямків.

Для окремого елемента зв'язку використовується класична формула теорії надійності [4; 13; 14]:

$$A_o^{(ез)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLDT} \quad (10)$$

де  $MTBF$  – середнє напрацювання на відмову;  $MTTR$  – середній час відновлення;  $MLDT$  – середній час логістичної затримки.

Для лінії зв'язку, що складається з  $n$  послідовно з'єднаних елементів [13; 14]:

$$A_o^{(лз)} = \prod_{j=1}^n A_o^{(езj)}. \quad (11)$$

Для інформаційного напрямку, що забезпечується  $m$  паралельними (резервуючими) лініями [14]:

$$A_o^{(ін)} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - A_o^{(лзk)}). \quad (12)$$

Тоді оперативна готовність системи (мережі) з урахуванням пріоритетів напрямків:

$$K_{ГОТ} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{ін}} w_k^{пр} \cdot A_o^{(інk)}}{\sum_{k=1}^{N_{ін}} w_k^{пр}}. \quad (13)$$

#### 3.2. Стійкість $P_C$

Показник  $P_C$  агрегує чотири підпоказники – живучість  $P_{Ж}$ , надійність  $P_{Н}$ , завадозахищеність  $P_{ЗЗ}$  та кіберзахищеність  $P_{КБ}$ :

$$P_C(X) = w_{\text{ж}} \cdot P_{\text{ж}} + w_{\text{н}} \cdot P_{\text{н}} + w_{\text{зз}} \cdot P_{\text{зз}} + w_{\text{кб}} \cdot P_{\text{кб}}. \quad (14)$$

Ваги  $w_{\text{ж}}, w_{\text{н}}, w_{\text{зз}}, w_{\text{кб}}$  адаптивно коригуються за рівнем загрози РЕБ противника.

**Живучість.** Ймовірність ураження вузла зв'язку вогневим засобом визначається як:

$$P_{\text{ураж}}(vz) = P_{\text{ур}}^{\text{base}} \cdot K_{\text{відст}} \cdot K_{\text{маск}} \cdot K_{\text{інж}}, \quad (15)$$

$$K_{\text{відст}} = \max\left(0, 1 - \frac{d_{\text{FLOT}}(vz)}{D_{\text{max}}^{\text{ураж}}}\right), \quad (16)$$

де  $d_{\text{FLOT}}(vz)$  – відстань до лінії зіткнення, обчислена за координатами вузла та фронтового рубежу;  $D_{\text{max}}^{\text{ураж}}$  – максимальна дальність застосування засобу ураження;  $K_{\text{маск}}, K_{\text{інж}}$  – коефіцієнти маскування та інженерного обладнання;  $P_{\text{ур}}^{\text{base}}$  – базова ймовірність ураження.

Ймовірність виживання вузла зв'язку:

$$P_{\text{вж}}(vz) = 1 - P_{\text{вияв}}(vz) \cdot P_{\text{ураж}}(vz). \quad (17)$$

Ймовірність збереження інформаційного напрямку через множини шляхів  $\Pi$  (графова модель) [14]:

$$P_{\text{збер}}^{(\text{ін})} = 1 - \prod_{\pi \in \Pi} \left(1 - \prod_{vz \in \pi} P_{\text{вж}}(vz)\right). \quad (18)$$

Тоді живучість системи:

$$P_{\text{ж}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{ін}}} w_k^{\text{пр}} \cdot P_{\text{збер}}^{(\text{ін}k)}}{\sum_{k=1}^{N_{\text{ін}}} w_k^{\text{пр}}}. \quad (19)$$

**Надійність.** За експоненційним законом для елемента  $R^{(\text{ез})}(t) = e^{-t/MTBF}$ ; для лінії з  $n$  елементами [14]:

$$R^{(\text{лз})}(t) = \exp\left(-t \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{MTBF_j}\right); \quad (20)$$

для напрямку з  $m$  паралельними лініями [14]:

$$R^{(\text{ін})}(t) = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - R^{(\text{лз}k)}(t)). \quad (21)$$

Для критичних напрямків із резервуванням використовується біноміальна формула (22) [13; 14]:

$$R^{k/n}(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i(t) (1 - R(t))^{n-i}. \quad (22)$$

**Завадозахищеність.** Для лінії з ППРЧ/DSSS введено коефіцієнт підсилення обробки (Processing Gain) та запас завадостійкості (Jamming Margin), які визначаються за (23) та (24) [7]:

$$G_p = 10 \lg \frac{B_{fhss}}{R_b}, \quad (23)$$

$$M_j = G_p - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\text{req}} - L_{\text{sys}}, \quad (24)$$

де  $B_{fhss}$  – смуга перестроювання;  $R_b$  – бітова швидкість інформаційного потоку;  $L_{sys}$  – системні втрати.

Відношення завада/сигнал для конкретної лінії з урахуванням геометрії визначається за формулою (25) [15]:

$$\frac{J}{S} = P_j + G_j - P_t - G_{ant} + 20 \lg \frac{d_{in}}{R_j}, \quad (25)$$

де  $P_j, G_j$  – потужність та виграш антени станції постановки завод;  $P_t, G_{ant}$  – характеристики передавача;  $d_{in}$  – довжина інформаційної лінії;  $R_j$  – відстань від РЕБ до приймача.

Показник заводозахисності лінії визначається за формулою (26):

$$K_{зз}^{(лз)} = \begin{cases} 1, & M_j > J/S, \\ \max(0, M_j/(J/S)), & M_j \leq J/S. \end{cases} \quad (26)$$

Агрегація загального показника заводозахисності на рівні системи зв'язку розраховується за формулою (27):

$$P_{зз} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{in}} w_k^{pp} \cdot \max_{лз \in \text{in}_k} K_{зз}^{(лз)}}{\sum_{k=1}^{N_{in}} w_k^{pp}}. \quad (27)$$

**Кіберзахисність** визначається композитною згорткою балів криптозахисту  $S_{crypto}$ , мережевого захисту  $S_{net}$ , процедурного захисту  $S_{proc}$  та частки зашифрованих ліній  $K_{crypto}^{cov}$  і визначається за формулою (28) [12]:

$$P_{КБ} = w_1 S_{crypto} + w_2 S_{net} + w_3 S_{proc} + w_4 K_{crypto}^{cov}. \quad (28)$$

**3.3. Мобільність  $T_M$**  визначається за формулами (29) та (30):

$$T_{розг}^{(вз)} = T_{марш} + \max_{j \in \text{вз}} T_{deploy}^{(j)}, \quad T_{марш} = \frac{D_{марш}}{V_{марш}}; \quad (29)$$

$$T_M(X) = \max_{vz \in \text{вз}} T_{розг}^{(vz)}. \quad (30)$$

Оскільки для показника  $T_M$  менше значення є кращим, нормалізація проводиться інверсно за формулою (49).

**3.4. Пропускна спроможність  $C$**

Базова теоретична ємність каналу визначається за формулою Шеннона – Хартлі (31) [7; 16]:

$$C_{теор} = B \cdot \log_2(1 + SNR_{lin}), \quad (31)$$

де  $B$  – смуга (Гц);  $SNR_{lin}$  – відношення сигнал/шум у лінійному вигляді.

Практична пропускна спроможність лінії з урахуванням спектральної ефективності  $\eta$  розраховується за виразом (32) [7; 17]:

$$C_{практ} = \min(C_{ТТХ}, C_{теор} \cdot \eta), \quad (32)$$

тоді ефективна пропускна спроможність з урахуванням накладних витрат криптозахисту та протоколів визначається за формулою (33):

$$C_{eff}^{(лз)} = C_{практ} \cdot (1 - OH_{crypto}) \cdot \eta_{proto}. \quad (33)$$

Пропускна спроможність інформаційного напрямку як суми паралельних ліній визначається за формулою (34):

$$C^{(ін)} = \sum_{k=1}^m C_{eff}^{(лзк)}, \quad (34)$$

тоді потрібна пропускна спроможність напрямку як сума вимог сервісів – за формулою (35):

$$C_{req}^{(ін)} = \sum_{s \in Serv(ін)} n_s \cdot BW_s, \quad (35)$$

а коефіцієнт пропускної спроможності напрямку – за формулою (36):

$$K_C^{(ін)} = \min \left( 1, \frac{C^{(ін)}}{C_{req}^{(ін)}} \right), \quad (36)$$

при цьому агрегація на рівні системи здійснюється за формулою (37):

$$C(X) = \frac{\sum_{k=1}^{N_{ін}} w_k^{пр} \cdot K_C^{(інк)}}{\sum_{k=1}^{N_{ін}} w_k^{пр}}. \quad (37)$$

### 3.5. Розвідзахищеність $K_{рз}$

Дальність виявлення джерела випромінювання станцією радіоелектронної розвідки визначається за формулою (38) [15]:

$$R_{detect}^{(вільн)} = \sqrt{\frac{EIRP \cdot G_{recon}^{ant}}{(4\pi)^2 \cdot P_{recon}^{min} / \lambda^2}}, \quad EIRP = P_t \cdot G_{ant}, \quad (38)$$

де  $R_{detect}^{(вільн)}$  – дальність виявлення джерела у вільному просторі;  $EIRP$  – еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність джерела;  $P_t$  – потужність передавача джерела;  $G_{ant}$  – коефіцієнт підсилення антени джерела;  $G_{recon}^{ant}$  – коефіцієнт підсилення антени станції розвідки в напрямі джерела випромінювання;  $P_{recon}^{min}$  – порогова чутливість приймача станції радіоелектронної розвідки (Вт);  $\lambda$  – довжина хвилі (м).

Коефіцієнт розвідзахищеності лінії визначається за формулою (39):

$$K_{рз}^{(лз)} = \frac{R_{recon}}{R_{detect}} \cdot K_{ппрч} \cdot K_{час}, \quad (39)$$

де  $R_{recon}$  – фактична відстань від станції розвідки до випромінювача;  $K_{ппрч}$  – коефіцієнт ППРЧ;  $K_{час}$  – коефіцієнт часового режиму (EMCON). Агрегація на рівні системи розраховується за формулою (40):

$$K_{рз}(X) = \frac{1}{N_{вз}} \sum_{i=1}^{N_{вз}} \min_{лз \in Вз_i} K_{рз}^{(лз)}. \quad (40)$$

## 4. Інтеграція геопросторової інформації

Ключовою особливістю запропонованої методики є використання геопросторової інформації на всіх етапах розрахунку. Геопросторова підсистема виконує чотири групи задач.

**4.1. Розрахунок рівня сигналу за рельєфом.** Для кожної пари вузлів ( $vz_a, vz_b$ ) будується профіль рельєфу  $\{h_{ij}\}_{i=1}^N$  з даних SRTM шляхом дискретизації великого кола між

точками з кроком  $\Delta d$  (типово 30–90 м). Корекція на кривизну Землі враховується за формулою (41) [18]:

$$h_i^{corr} = h_i + \frac{d_i(d - d_i)}{2kR_E}, \quad (41)$$

де  $d_i$  – відстань від першої точки;  $d$  – повна довжина інтервалу;  $R_E = 6\,371$  км;  $k = 4/3$  – еквівалентний радіус Землі.

Для кожної точки профілю обчислюється перша зона Френеля за формулою (42) [17; 18]:

$$F_1(d_i) = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_i(d - d_i)}{d}}, \quad \lambda = \frac{c}{f}. \quad (42)$$

Параметр Френеля-Кірхгофа для перешкоди  $i$  розраховується за формулою (43) [18]:

$$v_i = h_i^{obs} \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d_{ai} + d_{ib}}{d_{ai} \cdot d_{ib}}}, \quad (43)$$

дифракційні втрати за ITU-R P.526 – за формулою (44) [18]:

$$L_{diff}(v) = \begin{cases} 0, & v \leq -0,78 \\ 6,9 + 20 \lg(\sqrt{v^2 + 1} + v), & v > -0,78 \end{cases} \quad (44)$$

Загальні втрати у каналі (Link Budget) визначаються за формулою (45) [17]:

$$L_{total} = L_0 + L_{diff} + L_{atm} + L_{rain} + L_{feed}^{tx} + L_{feed}^{rx}, \quad (45)$$

де  $L_0$  – втрати у вільному просторі (FSPL) за формулою Фрііса [21];  $L_{atm}$  – атмосферне поглинання за ITU-R P.676 [13];  $L_{rain}$  – дощове ослаблення за ITU-R P.838 [14];  $L_{feed}^{tx}, L_{feed}^{rx}$  – втрати у фідерному тракті передавальної та приймальної сторін відповідно. Тоді рівень сигналу на приймачі розраховується за формулою (46) [21; 22]:

$$P_{rx} = P_t + G_{ant}^{tx} + G_{ant}^{rx} - L_{total}, \quad (46)$$

а відношення сигнал/шум + завада визначається відповідно до формули (47):

$$SINR = P_{rx} - 10 \lg \left( P_N + \sum_{j=1}^J P_j \right), \quad (47)$$

де  $N = 10 \lg(kTB) + NF$  – тепловий шум приймача, а сума  $\sum P_j$  враховує внесок усіх засобів постановки завад, перерахований за виразом (25).

**4.2. Зони радіопокриття.** Для кожного вузла зв'язку будується зона гарантованого покриття як геометрія (полігон) у системі WGS-84. Алгоритм, адаптований з напрацювань [22], сканує простір по азимутах  $\alpha \in [0, 2\pi)$  з кроком  $\Delta\alpha$ , для кожного напрямку методом бінарного пошуку визначає максимальну дальність  $d_{max}(\alpha)$ , при якій  $P_{rx}(d) \geq P_{sens}$ . Отриманий набір точок  $\{(\alpha_i, d_{max}(\alpha_i))\}$  формує контур зони, який далі відокремлюється як шар поверх топооснови і в подальшому використовується для розрахунків.

**4.3. Зони загроз противника.** Для кожної загрози  $t \in T$  обчислюється геометрія зони дії  $D_t$ : для вогневих засобів – коло радіуса  $D_{max}^{ураж}$  з центром у точці розташування; для засобів РЕБ – кільцева область із концентричними зонами ризику, розрахована аналогічно до (47) з перевищенням значення завада/сигнал над заданим порогом; для розвідки – коло радіуса  $R_{detect}$  за виразом (38). Результати використовуються у (15)–(17) для обчислення ймовірностей ураження та виявлення.

Просторова близькість вузлів до загроз та ліній зіткнення враховується безпосередньо у розрахункових формулах через координати та відстані.

### 5. Нормалізація, агрегація та класифікація

Нормалізація часткових показників “більше = краще” виконується відносно допустимого значення  $X_{\text{доп}}$ , заданого для ешелону та типу операції за формулою (48):

$$f_i^{\text{norm}}(X) = \frac{f_i(X)}{X_{\text{доп},i}}, \quad i \in \{1,2,4,5\}. \quad (48)$$

Для мобільності (менше = краще) застосовується інверсна нормалізація (49):

$$f_3^{\text{norm}}(X) = \frac{T_M^{\text{доп}}}{T_M(X)}. \quad (49)$$

Слід зазначити, що при здійсненні нормалізації показників за виразами (48) та (49) отримане значення нормалізованого параметра може бути більшим 1, що відрізняється від класичних підходів та враховує особливості побудови системи зв'язку, а саме – побудована система зв'язку (що оцінюється) повинна відповідати вимогам, які до неї висуваються.

Комплексна оцінка обчислюється за формулою (8). Класифікація результату здійснюється за шкалою (50):

$$\text{grade}(Z) = \begin{cases} \text{A (відмінна)}, & Z \geq 1,25, \\ \text{B (добра)}, & 1,00 \leq Z < 1,25, \\ \text{C (задовільна)}, & 0,85 \leq Z < 1,00, \\ \text{D (незадовільна)}, & 0,70 \leq Z < 0,85, \\ \text{E (критична)}, & Z < 0,70. \end{cases} \quad (50)$$

Числові пороги шкали  $\{0,70; 0,85; 1,00; 1,25\}$  отримано експертно за результатами опитування. Інтерпретація шкали узгоджена з категоріями якості НАТО MoE-індикаторів (Excellent / Good / Marginal / Inadequate / Critical) та підлягає подальшому калібруванню за результатами верифікації методики на ретроспективних статистичних даних бойового застосування СЗ.

Для візуалізації результатів застосовано радарну (павутинну) діаграму з двома контурами (фактичний та допустимий), теплову карту “вузол × показник” з правилами кольорового кодування, а також накладання зон радіопокриття та зон загроз на топографічну основу.

### 6. Просторово-часова агрегація.

Етапи розрахунку:

Етап 0. Визначення переліку комунікаційних послуг зв'язку: автоматичне профілювання сервісів за ешелонам, формування матриці інформаційних напрямків, розрахунок  $C_{req}^{(ін)}$  за формулою (35).

Етап 1. Розрахунок  $R_{ПГ}$  за формулами (9)–(13).

Етап 2. Розрахунок  $P_C$  за формулами (14)–(28).

Етап 3. Розрахунок  $T_M$  за формулами (29)–(30).

Етап 4. Розрахунок  $C$  за формулами (31)–(37) з використанням результатів формулами (41)–(47).

Етап 5. Розрахунок  $K_{PЗ}$  за формулами (38)–(40).

Етап 6. Нормалізація за формулами (48)–(49), перевірка виконання вимог  $f_i(X) \geq X_{\text{доп},i}$ .

Етап 7. Обчислення  $Z(X)$  за (8), класифікація за (50), формування діагностичного звіту з рекомендаціями щодо прийняття рішення з побудови системи зв'язку.

Програмна реалізація удосконаленої методики виконана як модуль .NET 8 + WPF з використанням Clean Architecture (шари Core, Data, WPF), Entity Framework Core для бази

даних (БД) та бібліотеки Marsui 5 для геопросторової візуалізації. Для обчислень рельєфу місцевості та поширення радіохвиль інтегровано алгоритми за рекомендаціями [13; 22; 23]. Для оцінки готовності радіоелектронного обладнання застосовано довідкові дані [23], для оцінки якості голосового зв'язку – модель E [24]. Результат оцінювання відобразиться у модулі “Ефективність” з радарною діаграмою, тепловою картою, діагностичним звітом із вузькими місцями СЗ та рекомендаціями змін на основі встановлених правил (рис. 1).

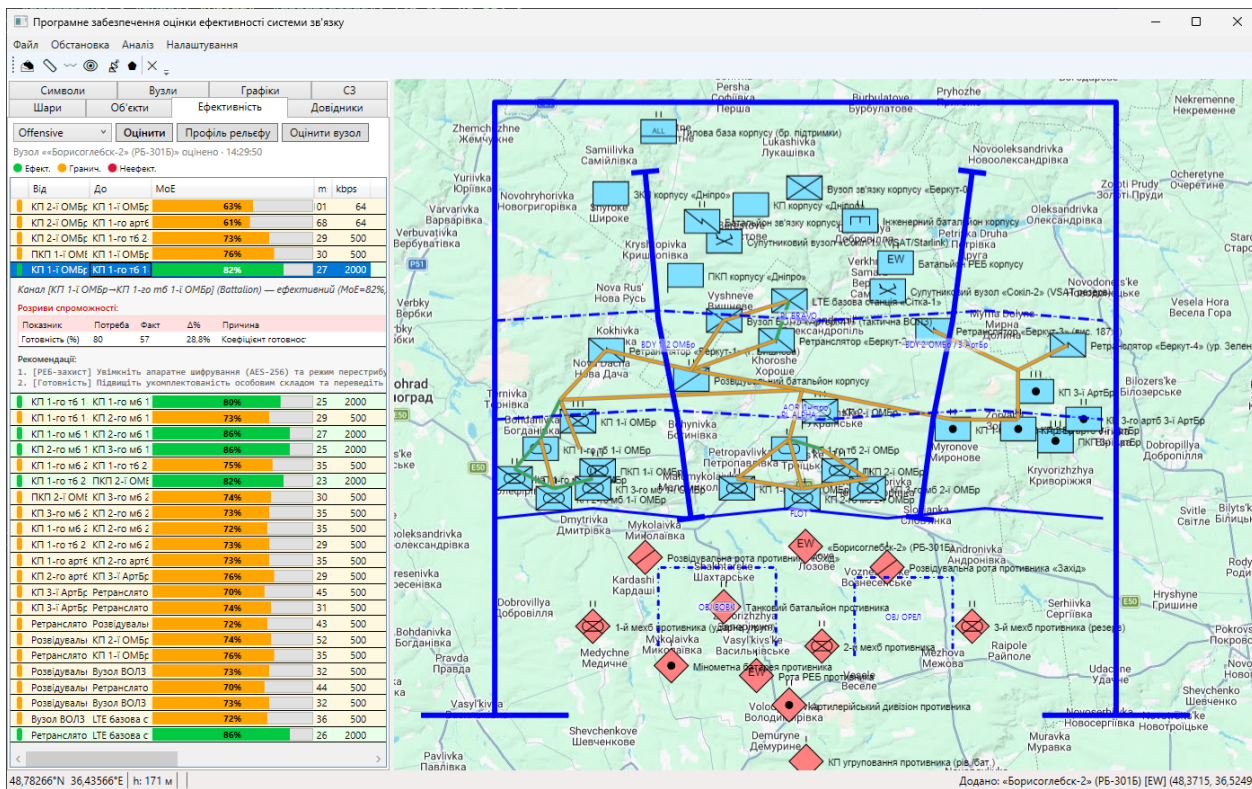


Рис. 1. Зовнішній вигляд вікна програмної реалізації методики

**Наукова новизна** запропонованої методики полягає у сукупності таких результатів.

1. Нова формалізація задачі оцінювання ефективності СЗ як задачі багатокритеріальної оптимізації (5) на Парето-множині (7) з адитивною згортою (8), що вперше одночасно:

- повністю охоплює всі п'ять показників згідно з вимогами ДДП 6-26.22 [1];
- узгоджується з концепцією NATO МоЕ/МоР за SAS-026 COBR [3] та AJP-6 [2];
- явно враховує суперечливість показників через механізм Парето-домінування (6).

На відміну від [5–9], у яких розглядаються окремі радіотехнічні або показники надійності без інтегральної оцінки, у запропонованій методиці вперше побудовано замкнений математичний апарат від рівня елемента зв'язку до рівня СЗ.

2. Удосконалена процедура розрахунку живучості та завадозахищеності СЗ за рахунок інтеграції графової моделі інформаційних напрямків (18), (21) з геопросторово залежними ймовірностями ураження (15)–(17) та реальною геометрією впливу РЕБ (25), (47). Це дозволяє, на відміну від класичного підходу, отримувати значення  $P_{Ж}$  та  $P_{ЗЗ}$ , які залежать не лише від технічних характеристик засобів, а й від взаємного розташування вузлів СЗ, лінії зіткнення та засобів ураження і РЕБ противника на цифровій карті.

3. Новий метод інтегрованого розрахунку пропускної спроможності з урахуванням геопросторової інформації, який через єдиний обчислювальний математичний апарат (31)–(37), (41)–(47) прив'язує значення  $SINR$  кожної лінії до профілю рельєфу, атмосферного поглинання, впливу РЕБ і сукупно агрегує результат до показника  $C$  системи. Це відрізняє

наведену методику від засобів розрахунку типу Radio Mobile, Radio Planner, ATOLL, які дають рівень сигналу, але не переводять його у показник ефективності СЗ.

4. Удосконалена математична модель розвідзахищеності (38)–(40) як комбінація дальності виявлення, фактичної геометрії розміщення станцій розвідки, коефіцієнтів ППРЧ та часового режиму Emission Control, що дозволяє кількісно оцінювати  $K_{PЗ}$  через конкретне розташування вузлів на карті.

Таким чином, відмінність запропонованої методики від наявних полягає у комплексному, математично замкненому та геопросторово-орієнтованому підході до оцінювання ефективності СЗ, узгодженому одночасно з національними підходами та стандартами НАТО. Практична цінність методики підтверджується її реалізацією у програмному модулі та верифікацією на модельних прикладах побудови СЗ. Отримані з використанням розробленого програмного забезпечення результати розрахунків дозволяють зробити висновок про коректність отриманих результатів.

### Висновки

Сформульовано та математично формалізовано задачу оцінювання ефективності системи військового зв'язку з врахуванням стандартів НАТО як задачу багатокритеріальної оптимізації (5) на Парето-множині (7) з адитивною згорткою (8), що одночасно узгоджена з п'ятьма показниками ефективності (згідно з ДДП 6-26.22) та концепцією НАТО МоЕ/МоР.

Побудовано замкнений математичний апарат обчислення п'яти часткових показників – постійної готовності (9)–(13), стійкості (14)–(28), мобільності (29)–(30), пропускної спроможності (31)–(37) та розвідзахищеності (38)–(40), який охоплює всі рівні ієрархії – від елемента зв'язку до СЗ – і дозволяє виконувати обчислення з урахуванням реальних ТТХ засобів та геометрії розміщення.

Обґрунтовано використання геопросторової інформації у вигляді даних висот місцевості, координат вузлів, ліній зіткнення та геометрії загроз противника безпосередньо у формулах часткових показників. Це забезпечує залежність оцінок живучості, заводозахищеності, пропускної здатності та розвідзахищеності від реальних умов розгортання СЗ, а не лише від ТТХ обладнання, що є принциповою перевагою методики.

Запропонована методика придатна до програмної реалізації та інтеграції з геоінформаційною системою: розроблений програмний модуль підтверджує практичність апарату та дозволяє ОПР виконувати оперативну оцінку варіантів побудови СЗ у режимі, наближеному до реального часу.

**Напрямами подальших досліджень є:** побудова еволюційного алгоритму пошуку Парето-оптимальних варіантів СЗ у просторі допустимих розміщень вузлів; інтеграція модуля із системами ситуаційної обізнаності; включення стохастичних моделей впливу кіберзагроз у розрахунок  $P_{КБ}$ ; верифікація значень коефіцієнтів (9), (14) на основі статистики бойових дій.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДДП 6-26.22. Настанова “Зі зв'язку Збройних Сил України”.
2. Allied Joint Publication AJP-6. Allied Joint Doctrine for Communication and Information Systems. Edition A, Version 1. NATO Standardization Office, 2011. 82 p. URL: <https://nso.nato.int>.
3. NATO Code of Best Practice for Command and Control Assessment. RTO Technical Report SAS-026. Research and Technology Organisation, 2002. 340 p. URL: <https://nso.nato.int>.
4. NATO Standardization Office. Allied Reliability and Maintainability Publication 1 (ARMP-1), Edition D (STANREC 4174). 2022. URL: <https://nso.nato.int>.
5. Коваленко І., Масесов М., Драглюк О., Ткаченко А. Методика побудови радіорелейних ліній зв'язку на основі використання геопросторової інформації // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. 2023. № 3. С. 45–54. DOI: <https://doi.org/10.58254/viti.3.2023.04.31>.
6. Цифрові системи військового зв'язку / А. М. Яценко, В. В. Ходченко, О. С. Петренко та ін. К.: НУОУ, 2018. 268 с.

7. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1150 p. URL: <https://www.mheducation.com>.
8. Alberts D. S., Hayes R. E. Code of best practice for experimentation. CCRP Publication Series. DoD. 2002. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA457167.pdf>.
9. Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P. Network centric warfare: Developing and leveraging information superiority (2nd ed.). CCRP. 1999. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA406255.pdf>.
10. Чеботарьова Д., Безрук В. Автоматизація вибору оптимальних проектних варіантів систем зв'язку на основі методів багатокритеріальної оптимізації // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2021. № 2 (2). С. 54–61. URL: <https://science.lpnu.ua/ictce/all-volumes-and-issues/volume-1-number-2-2021>.
11. Масесов М. О. Концептуальна модель предметної області системи зв'язку // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. 2025. Вип. 7. С. 92–99. URL: <https://doi.org/10.58254/viti.7.2025.09.92>.
12. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. Vol. 1, Issue 1. P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
13. U.S. Department of Defense MIL-HDBK-217F Notice 2: Reliability Prediction of Electronic Equipment. 1995. Also available online, URL: [http://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC\\_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILHDBK217.pdf](http://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILHDBK217.pdf).
14. Barlow R. E., Proschan F. Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models. New York: Holt, Rinehart; Winston, 1975.
15. Adamy D. L. EW 101: A First Course in Electronic Warfare. Boston: Artech House, 2009.
16. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal. Vol. 27, Issue 3. P. 379–423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
17. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2. Prentice Hall, 2002.
18. ITU-R Recommendation P.526-15. Propagation by diffraction. Geneva: International Telecommunication Union, 2019. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526/>.
19. Friis H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. Proceedings of the IRE. Vol. 34, Issue 5. P. 254–256. DOI: 10.1109/JRPROC.1946.234568.
20. ITU-R Recommendation P.676-12. Attenuation by atmospheric gases and related effects. Geneva: International Telecommunication Union, 2019. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/>.
21. ITU-R Recommendation P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Geneva: International Telecommunication Union, 2005. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/>.
22. ITU-R Recommendation P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. Geneva: International Telecommunication Union, 2021. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/>.
23. IEC 61709:2017 «Electric components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion» або 217Plus:2015 RIAC Handbook of 217Plus Reliability Prediction Models).
24. ITU-T Recommendation G.107. The E-model: a computational model for use in transmission planning. Geneva: ITU-T, 2015. 32 p. URL: [https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.107-201506-I!!PDF-E&type=items](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.107-201506-I!!PDF-E&type=items).

*Надійшла до редколегії 20.04.2026.*

*Схвалена до друку 22.05.2026.*

*Дата публікації 29.05.2026.*