

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-195-204

УДК 621.39:355.4

Білоус Олег Володимирович

<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 27.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 28.04.2026; Дата публікації: 30.05.2026

УДОСКОНАЛЕНА СУКУПНІСТЬ ЧАСТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ MESH-МЕРЕЖ

У роботі проведено аналіз науково-методичних підходів до оцінювання ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення з використанням технології mesh-мереж. Встановлено, що відомі підходи недостатньо враховують особливості самоорганізованих мереж, зокрема просторову доступність і зв'язаність мережі в умовах динамічної зміни топології. Обґрунтовано удосконалену сукупність часткових показників, до складу якої включено показники доступності, зв'язаності та якості надання сервісів зв'язку, а також визначено логіку їх поєднання в узагальненому показнику ефективності функціонування системи.

Запропонована система часткових показників може бути використана для більш обґрунтованого оцінювання ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення, уточнення підходів до планування архітектури з використанням технології mesh-мереж, а також для вдосконалення оперативно-тактичних розрахунків у процесі організації зв'язку, особливо в умовах вогневого та радіоелектронного впливу противника.

Ключові слова: система зв'язку; інформаційно-комунікаційна система; mesh-мережа; часткові показники; доступність мережі; зв'язаність мережі; якість надання сервісів зв'язку.

Вступ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення (СЗВП) в умовах сучасних бойових дій, яким притаманні висока динаміка зміни оперативної обстановки, вогневий вплив противника, радіоелектронне протиборство та постійна зміна топології мережі [1]. Досвід бойового застосування свідчить про обмеженість традиційних ієрархічних архітектур систем зв'язку та наявних методик оцінювання, орієнтованих на стаціонарні топології [2-13]. У дослідженні використано системний аналіз науково-методичних підходів, критичний аналіз існуючих моделей, а також методи математичної формалізації, геометричного опису та теорії графів. Встановлено, що відомі підходи недостатньо враховують стохастичну природу mesh-мереж, їх здатність до самовідновлення, реконфігурації маршрутів і збереження функціонування в умовах вогневого та радіоелектронного впливу.

У сучасних бойових діях СЗВП є одним із ключових елементів забезпечення стійкого управління військами, оскільки саме вона визначає можливість своєчасного обміну оперативно-тактичною інформацією в умовах вогневого ураження, радіоелектронного протиборства та високої динаміки зміни обстановки [14-17]. Аналіз досвіду ведення бойових дій у ході російсько-

української війни показує, що традиційна архітектура систем зв'язку, побудована на стаціонарних вузлах та ієрархічних радіонапрямах, виявляє критичну вразливість до ураження, демаскування та втрати окремих вузлів. Це зумовлює необхідність переходу до розподілених, високоманеврених і самоорганізованих мережевих рішень, зокрема на основі технології mesh-мереж [19-22].

Проблематика оцінювання ефективності функціонування СЗВП неодноразово розглядалася у працях, присвячених класичним підходам до оцінювання ефективності функціонування інформаційно-комунікаційних систем, телекомунікаційних мереж, від працездатності яких залежить виконання критично важливих функцій, а також безпосередньо СЗВП [2-4]. Проведений аналіз показав, що більшість відомих підходів виходили з припущення про відносну структурованість мережі та фіксованість маршрутів. Такі методики переважно розглядають параметри мережі як детерміновані величини і тому не враховують безперервної зміни топології, притаманної mesh-мережам. Значним кроком у розвитку науково-методичного апарату стала робота [13], у якій було обґрунтовано необхідність врахування показників якості надання сервісів зв'язку (англ. quality of service, QoS), зокрема пропускну здатності, затримки, втрат пакетів і джитеру [24]. Водночас критичний аналіз цього підходу показав, що він має суттєві обмеження для

оцінювання ефективності функціонування СЗВП у сучасних умовах, оскільки орієнтується на фіксовані інформаційні напрямки, недостатньо враховує доступність сервісів в умовах деструктивного впливу противника і засобів радіоелектронної боротьби, а також допускає адитивне згортання показників, яке може маскувати критичні провали окремих параметрів.

Отже, проведене дослідження показало, що існуючі методики не забезпечують у повній мірі адекватного оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж. Між стохастичною природою самоорганізованих мереж і статичним характером наявних методик існує об'єктивна суперечність, подолання якої потребує удосконалення складу часткових показників оцінювання та їх узгодженого використання в межах єдиного підходу.

У цій статті під СЗВП розуміється сукупність сил, засобів і мережевих рішень, призначених для забезпечення обміну інформацією в інтересах управління військами, а під технологією mesh-мереж – самоорганізована мережева архітектура з динамічною маршрутизацією та можливістю реконфігурації зв'язків між вузлами [25, 26]. Гіпотеза дослідження полягає в тому, що адекватне оцінювання ефективності функціонування такої системи можливе лише за умови комплексного врахування трьох взаємопов'язаних аспектів: доступності мережі, її зв'язаності та QoS.

Метою статті є обґрунтування удосконаленої сукупності часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є функціонування СЗВП. Предметом дослідження є сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Методичну основу дослідження становили системний аналіз і критичний аналіз наявних науково-методичних підходів до оцінювання ефективності функціонування СЗВП, метод математичної формалізації, метод геометричного опису району функціонування мережі, графове подання топології mesh-мережі та нормалізація часткових показників у єдиній безрозмірній шкалі. Застосування зазначених методів було спрямоване на обґрунтування удосконаленої сукупності часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

На початковому етапі дослідження було проаналізовано відомі підходи до оцінювання ефективності функціонування СЗВП.

Фундаментальні основи оцінювання ефективності систем зв'язку та телекомунікаційних мереж були закладені у класичних працях. У ранніх моделях, представлених, зокрема, у монографії [2], системи

зв'язку розглядалися як відносно стаціонарні структури з наперед визначеною топологією та виділеними каналами передавання. Як часткові показники переважно використовували пропускну спроможність ($\mu_{СЗ}$) та коефіцієнт стійкості ($K_{стСЗ}$) системи, а узагальнений показник ефективності подавався у вигляді функціональної залежності:

$$Q = f(\mu_{СЗ}, K_{стСЗ}) \quad (1)$$

Така формалізація адекватно відображала реалії ієрархічних систем з комутацією каналів, де стійкість забезпечувалася структурним резервуванням, а топологія мережі залишалася незмінною протягом тривалого часу.

Розвиток методів дослідження операцій сприяв появі імовірнісних підходів. В окремих роботах, зокрема у дослідженнях [3] та [4], ефективність інтерпретувалася через часові параметри циклу управління. Узагальнений показник розглядався як імовірність того, що час доставки повідомлення не перевищить заданого оперативно-тактичними нормативами граничного значення:

$$Q = P(t \leq T_{зад}) \quad (2)$$

де t – час доставки повідомлення;
 $T_{зад}$ – граничне значення часу доставки повідомлення задане оперативно-тактичними нормативами.

Цей підхід дозволив пов'язати технічні параметри зв'язку з оперативною ефективністю управління. Проте він, як правило, базувався на припущеннях про сталість потоків заявок та відсутність взаємозв'язку між відмовами елементів мережі, що є істотним спрощенням для умов вогневого ураження.

Подальше ускладнення завдань управління вимагало переходу до багатокритеріального оцінювання, що знайшло відображення у працях [5-8]. Автори [5, 8] запропонували відмовитися від єдиного скалярного показника на користь векторного показника, який дозволяє одночасно враховувати різноманітні вимоги до СЗВП, таких як постійна готовність до забезпечення управління військами (силами), стійкість, мобільність, пропускну спроможність та розвідзахищеність [14]. Для зведення цих показників до єдиного узагальненого часто використовується метод адитивної згортки (зваженої суми):

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i q_i \quad (3)$$

де q_i – нормоване значення i -го часткового показника;

a_i – ваговий коефіцієнт, що визначає пріоритетність цього показника для виконання бойового завдання.

У працях [6, 7] розглянуто просторову складову ефективності систем зв'язку. Зокрема, систему зв'язку цивільної інфраструктури подано, як розподілену систему, ефективність якої

залежить не лише від стану каналів, а й від топологічної зв'язаності вузлів на місцевості. Такий підхід є критично важливим для розуміння живучості мережі, проте класичні методи часто ігнорують високу динаміку змін цієї топології.

Проведений аналіз показав, що існуючі методики не забезпечують повною мірою адекватного оцінювання функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж, оскільки переважно орієнтовані на статичні топології та не враховують у достатній мірі стохастичний характер самоорганізованих мереж. Установлено, що розв'язання цієї суперечності потребує інтеграції показників доступності, зв'язності та якості надання сервісів зв'язку в межах єдиного підходу до оцінювання.

Як вихідне положення для подальшого дослідження використано відомий підхід, у якому ефективність функціонування окремого інформаційного напрямку описується через показники якості надання сервісів зв'язку [13], спираючись на рекомендації [24] та базові визначення військового зв'язку [15, 16. У межах цього підходу враховуються пропускна спроможність, середня затримка передавання даних, імовірність втрати пакетів і джитер, що дає змогу характеризувати функціональний аспект роботи мережі та створює основу для подальшого використання показника QoS у складі удосконаленої сукупності часткових показників.

$$Q_{\text{СЗВП}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{ІН}_i}}{n}, \quad (4)$$

де $Q_{\text{СЗВП}}$ – коефіцієнт ефективності функціонування СЗВП;
 n – кількість інформаційних напрямків СЗВП;
 $Q_{\text{ІН}_i}$ – ефективність функціонування i -го інформаційного напрямку.

Однак такий підхід є неприйнятним, оскільки не враховує ступеню важливості інформаційного напрямку. Зокрема, інформаційний напрямок із пунктом управління (ПУ) вищого рівня не може оцінюватися на одному рівні з інформаційним напрямком ПУ нижчого рівня. Втрата зв'язку з ПУ вищого рівня призводить до значно серйозніших наслідків, ніж у разі втрати зв'язку з менш важливим ПУ, що не приймають безпосередньої участі в операції (місії). Динамічний характер сучасних бойових дій (наприклад, під час масованого авіаційного нальоту) також вимагає оперативної зміни пріоритетів інформаційних напрямків зв'язку. Отже, показник ефективності, що усереднює всі напрямки (формула 4), не забезпечує адекватної оцінки роботи системи. Таким чином, виникла необхідність розподілу інформаційних напрямків за групами важливості [14].

До першої групи важливості (найвищий пріоритет) входять інформаційні напрями з ПУ: старшого штабу, військ першого ешелону, мобільного ешелону (при веденні маневреної

оборони), угруповання десантно-штурмових військ, угруповання ракетних військ і артилерії ЗС України, угруповання сил і засобів авіації ЗС України, угруповання сил і засобів протиповітряної оборони ЗС України, угруповання сил і засобів видів, родів військ (сил) ЗС України, угруповання спеціальних військ ЗС України.

До другої групи важливості (середній пріоритет) входять інформаційні напрями з ПУ: військ другого ешелону, резервів, сусідів, угруповання інших складових сил оборони, військових частин, підрозділів інших видів, родів, військ (сил) ЗС України, військових частин (підрозділів) угруповання спеціальних військ, які не ввійшли до першої групи важливості, ешелонів – ізоляції району конфлікту, пошуково-ударний, забезпечення охорони об'єктів та комунікацій, негайного реагування.

До третьої групи важливості (нижчий пріоритет) належать інформаційні напрями з ПУ: угруповання Сил логістики ЗС України, угруповання Медичних сил ЗС України, частин забезпечення та військових частин, підрозділів, установ, які не ввійшли до першої та другої груп важливості.

Враховуючи такий розподіл, автором [13] був запропонований узагальнений показник ефективності функціонування СЗВП:

$$Q_{\text{СЗВП}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Q_{\text{ІН}_i^1} \cdot k_1}{n_1} + \frac{\sum_{i=1}^{n_2} Q_{\text{ІН}_i^2} \cdot k_2}{n_2} + \frac{\sum_{i=1}^{n_3} Q_{\text{ІН}_i^3} \cdot k_3}{n_3}, \quad (5)$$

де n_1 – кількість інформаційних напрямків першої групи важливості;
 n_2 – кількість інформаційних напрямків другої групи важливості;
 n_3 – кількість інформаційних напрямків третьої групи важливості;
 $Q_{\text{ІН}_i^1}$ – ефективність функціонування i -го інформаційного напрямку першої групи важливості;
 $Q_{\text{ІН}_i^2}$ – ефективність функціонування i -го інформаційного напрямку другої групи важливості;
 $Q_{\text{ІН}_i^3}$ – ефективність функціонування i -го інформаційного напрямку третьої групи важливості;
 k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти важливості для першої групи, другої та третьої груп відповідно.

Такий підхід забезпечує системність оцінювання, коли кінцевий результат формується на основі зваженого врахування ефективності усіх інформаційних напрямків з урахуванням їхньої групи важливості. Це дозволяє моделювати вплив порушення зв'язку в окремих сегментах на загальну стійкість системи, а також прогнозувати рівень постійної готовності у разі зміни топології або бойових умов.

Одним із визначальних часткових показників, які входять до складу $Q_{\text{ІН}_i^1}$, $Q_{\text{ІН}_i^2}$, $Q_{\text{ІН}_i^3}$ (формула 5), є K_{QoS} . Вона характеризує спроможність системи забезпечувати гарантований рівень своєчасної,

достовірної та безперервної передачі даних в інформаційних напрямках ПУ всіх груп важливості.

Для СЗВП показники QoS набувають особливого значення, оскільки відображає функціональну стійкість [27], здатність її підтримувати необхідну пропускну спроможність, забезпечувати допустимі затримки передачі даних, мінімізувати втрати пакетів та джитеру.

Згідно з [13], ефективність функціонування окремого інформаційного напрямку може бути представлена у вигляді функціональної залежності:

$$Q_{in_i} = f(C, T, P, J), \quad (6)$$

де C – пропускну спроможність;
 T – середня затримка передачі даних;
 P – імовірність втрати пакетів;
 J – джитер, що характеризує нестабільність часових параметрів передачі.

Така формалізація дозволяє інтегрувати технічні характеристики каналів у єдиний узагальнений показник, який не лише відображає технічний стан мережі, але й демонструє її функціональну стійкість. Під функціональною стійкістю розподілених інформаційних систем розуміється властивість системи зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, при впливі потоку експлуатаційних відмов, збоїв, пошкоджень, навмисної шкоди, втручання в обмін та обробку інформації, а також при помилках обслуговуючого персоналу [27]. Це створює основу для подальшого узгодженого використання показників QoS у складі комплексної моделі оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Під час дослідження було прийнято, що для адекватного оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж необхідно одночасно враховувати три взаємодоповнювальні часткові показники: доступність мережі, її зв'язаність та QoS. Таке припущення ґрунтується на тому, що сам по собі показник QoS не відображає просторову доступність мережі, ані ступінь збереження її топологічної цілісності в умовах бойового застосування.

Для формалізації показника доступності район функціонування СЗВП задався у вигляді еліптичної області. Площа цієї області використовувалася як базова характеристика району виконання завдань. У межах району розглядалася сукупність вузлів доступу, для кожного з яких задавалися координати розміщення та радіус упевненого покриття. Ефективна площа покриття визначалася як площа перетину району операції з об'єднанням усіх зон радіодоступу, а показник доступності – як відношення ефективної площі покриття до загальної площі району операції. Такий підхід дає змогу оцінити, яка

частина району бойових дій забезпечена стійким доступом до мережі зв'язку.

Для формалізації показника зв'язаності топологію mesh-мережі подано у вигляді графу, вершини якого відповідають базовим станціям і мобільним вузлам, а ребра – активним з'єднанням між ними. При цьому з'єднання між мобільними вузлами та між мобільними вузлами і базовими станціями задавалися окремо з урахуванням радіуса взаємодії мобільних вузлів і радіуса прямого доступу до базової станції. На відміну від класичних показників зв'язаності графа, запропонований показник зв'язаності враховує не лише факт досяжності базових станцій, а й кількість незалежних маршрутів доступу до них. Це дозволяє оцінити ступінь структурної інтегрованості мобільних вузлів у мережу та рівень резервування маршрутів у разі часткового ураження вузлів, руйнування окремих ліній зв'язку або зміни топології мережі.

Для забезпечення метричної сумірності всі три часткові показники – показник доступності, показник зв'язаності та показник якості надання сервісів зв'язку – було приведено до інтервалу $[0;1]$. Нормалізація забезпечує уніфікований підхід до подальшого зіставлення технічних, просторових і топологічних характеристик системи в єдиній метричній шкалі та створює підґрунтя для формування узгодженого підходу до побудови узагальненого показника ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Результати

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано удосконалену сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж. На відміну від підходів, що орієнтуються переважно на технічні характеристики окремих каналів або фіксованих інформаційних напрямків, запропонована сукупність показників включає три взаємодоповнювальні часткові показники: показник доступності, показник зв'язаності та показник QoS.

До удосконаленої сукупності часткових показників включено показник QoS. Він характеризує функціональний аспект роботи системи зв'язку та відображає її здатність забезпечувати необхідну пропускну спроможність, допустиму затримку передавання даних, прийнятний рівень втрат пакетів і джитеру. Використання цього показника як базового дозволило зберегти наступність із наявними підходами до оцінювання ефективності функціонування інформаційних напрямків.

У межах удосконалення сукупності часткових показників введено показник доступності мережі, який характеризує частку площі району виконання завдань, у межах якої забезпечується доступ до ресурсів mesh-мережі, та визначається за формулою:

$$K_{\text{дост}} = \frac{S_{\text{еф}}}{S_{\Omega}}, \quad (7)$$

де $S_{\text{еф}}$ – ефективна площа покриття району операції мережею, км²;
 S_{Ω} – площа району операції, км²;

На відміну від традиційних показників технічної надійності, цей показник відображає не стан окремого вузла в часі, а просторову можливість користувачів отримати доступ до сервісів зв'язку в межах заданого району бойових дій. Таким чином, показник доступності дозволяє кількісно врахувати просторовий аспект структурної стійкості системи.

Крім того, удосконалену сукупність часткових показників доповнено показником зв'язаності мережі, який характеризує ступінь структурної інтегрованості мобільних вузлів у мережу та рівень резервованості маршрутів доступу до базових станцій. Показник зв'язаності визначається як середнє нормоване значення зв'язаності для всіх пар вузлів графа:

$$K_{\text{зв}} = \frac{2}{T(T-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_{ij}, \quad 0 \leq K_{\text{зв}} \leq 1, \quad (8)$$

де $K_{\text{зв}}$ – коефіцієнт зв'язаності мережі;
 N – кількість вузлів мережі;
 c_{ij} – це нормований показник зв'язаності між вузлами i та j .

Нормований показник зв'язаності вузлів відображає ступінь резервованості маршрутів між ними: значення 0 відповідає відсутності зв'язку, значення 1/3 – наявності одного маршруту, значення 2/3 – двох незалежних маршрутів, а значення 1 – трьома і більше незалежними маршрутами, що приймаються як нормативно достатній рівень резервування, за якого зв'язок між вузлами вважається достатньо стійким до одиничних і частково кратних порушень структури мережі. При $K_{\text{зв}} = 0$ мережа є повністю фрагментованою й не забезпечує інформаційної взаємодії між вузлами, а значення $K_{\text{зв}} = 1$ відповідає стану, за якого між будь-якою парою вузлів існує не менше трьох незалежних маршрутів. Таким чином, показник $K_{\text{зв}}$ комплексно враховує як наявність зв'язку між вузлами, так і його резервованість, а отже є більш адекватним для оцінювання структурної стійкості mesh-мережі, ніж прості бінарні характеристики досяжності.

На відміну від класичних показників зв'язності графа, запропонований показник враховує не лише сам факт досяжності, а й кількість незалежних маршрутів доступу до базових станцій. Це дає змогу більш адекватно відобразити стійкість mesh-мережі до втрати окремих вузлів, руйнування ліній зв'язку та змін топології в умовах бойового застосування.

Установлено, що кожен із трьох часткових показників виконує окрему, але взаємопов'язану

роль в оцінюванні ефективності функціонування СЗВП. Показник доступності характеризує переважно просторову основу структурної стійкості мережі, показник зв'язаності – її топологічну цілісність і резервованість маршрутів, а показник QoS – функціональну стійкість системи під час передавання даних. Спільне використання цих показників дає змогу перейти від локального оцінювання окремих каналів або напрямків до комплексного оцінювання реальної боєздатності системи зв'язку.

Для зручності оцінювання всі три часткові показники було приведені до єдиної безрозмірної шкали в інтервалі [0;1]. Це забезпечує їхню метричну сумірність і створює можливість подальшого узгодженого використання в межах єдиного підходу до оцінювання ефективності функціонування системи.

Таким чином, за результатами дослідження сформульовано загальну функціональну залежність узагальненого показника ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж:

$$E_{\text{mesh}} = f(K_{\text{дост}}, K_{\text{зв}}, K_{\text{QoS}}). \quad (9)$$

Ця залежність відображає логіку спільного врахування показника доступності, показника зв'язаності та показника QoS як трьох базових складових оцінювання. Отриманий результат створює підґрунтя для подальшого аналітичного виведення математичної моделі та розроблення методики оцінювання ефективності функціонування системи на наступних етапах дослідження.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що удосконалена сукупність часткових показників може бути використана під час кількісного оцінювання ефективності функціонування СЗВП, обґрунтування рішень щодо побудови архітектури mesh-мереж, а також удосконалення оперативного-тактичних розрахунків при плануванні організації зв'язку в бойових умовах. Взаємозв'язок часткових показників, їх змістовна характеристика та приналежність до відповідних властивостей стійкості системи наведені в табл. 1.

Удосконалена сукупність часткових показників формується трьома базовими компонентами – показником доступності, показником зв'язаності та показником якості надання сервісів зв'язку. У цій структурі показник доступності визначає просторову основу структурної стійкості системи, показник якості надання сервісів зв'язку відображає її функціональну стійкість, а показник зв'язаності є зв'язувальною ланкою, яка в поєднанні з показником доступності характеризує структурну стійкість, а в поєднанні з показником якості надання сервісів зв'язку – функціональну стійкість системи.

Таблиця 1

Удосконалена сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП

Частковий показник	Що характеризує	Характеристика стійкості, що оцінюється	Основні параметри / основа формалізації
K_{QoS}	Спроможність СЗВП забезпечувати своєчасну, достовірну та безперервну передачу даних в інформаційних напрямках	Переважно функціональна стійкість	Пропускна спроможність, середня затримка, імовірність втрати пакетів, джитер; функціональна залежність формула (6)
$K_{дост}$	Частку району виконання завдань, у межах якої забезпечується доступ до мережі зв'язку	Переважно структурна стійкість	Геометричний опис району функціонування; площа покриття; координати вузлів; радіуси впевненого покриття; відношення ефективної площі покриття до площі району операції
$K_{зв}$	Ступінь структурної інтегрованості мобільних вузлів у мережу та рівень резервованості доступу до базових станцій	Поєднує структурну і функціональну стійкість	Графове подання топології mesh-мережі; множина базових станцій і мобільних вузлів; активні з'єднання між ними; кількість незалежних маршрутів доступу до базових станцій

Обговорення

Проведене дослідження показало, що наявні підходи, орієнтовані на стаціонарні топології, не забезпечують повною мірою адекватного оцінювання таких систем, оскільки не враховують стохастичну природу самоорганізованих мереж, динамічну реконфігурацію маршрутів, вплив втрати вузлів і необхідність резервування зв'язків.

У цьому сенсі запропонована удосконалена сукупність часткових показників не заперечує попередні результати, а розвиває їх. Використання показника якості надання сервісів зв'язку зберігає наступність із наявними підходами, у яких QoS уже розглядався як важливий засіб опису функціонального стану інформаційних напрямків. Разом з тим проведений аналіз підтвердив, що в умовах застосування технології mesh-мереж такого показника недостатньо, оскільки він не охоплює ані просторову доступність мережі, ані ступінь збереження її топологічної цілісності. Саме тому введення показника доступності та показника зв'язаності є логічним продовженням і розширенням попереднього науково-методичного апарату, а не його запереченням.

Окремо слід підкреслити змістовну роль кожного з трьох базових компонентів. Показник QoS відображає переважно функціональну стійкість системи, оскільки характеризує її здатність підтримувати необхідну пропускну спроможність, допустимі затримки, прийнятний рівень втрат пакетів і джитеру. Показник доступності характеризує переважно структурний аспект стійкості, оскільки відображає просторове охоплення району виконання завдань радіодоступом і, відповідно, можливість забезпечення безперервного інформаційного обміну в розосередженому районі дій. Водночас показник зв'язаності виконує інтегративну функцію: у поєднанні з показником доступності він формує структурну стійкість системи, а в поєднанні з показником QoS – її функціональну

стійкість. Саме цей показник поєднує топологічну цілісність мережі з її здатністю забезпечувати безперервне надання сервісів зв'язку.

Отже, науковий результат цієї статті полягає не лише в розширенні переліку часткових показників, а й у встановленні їхнього функціонального взаємозв'язку в межах єдиної логіки оцінювання. Це підтверджується тим, що всі три показники приведено до інтервалу $[0;1]$, що забезпечує їхню метричну сумірність і створює основу для подальшої інтеграції в узагальнений показник. Така нормалізація важлива не сама по собі, а тому, що дозволяє зіставляти технічні, просторові й топологічні аспекти функціонування системи в єдиній шкалі та комплексно оцінювати її боєздатність у реальних умовах бойового застосування.

Порівняно з попередніми підходами запропонована сукупність показників має кілька переваг. По-перше, вона краще відповідає специфіці бойового застосування СЗВП з використанням технології mesh-мереж, де критичними є не лише якість передавання даних, а й збереження доступу до мережі та можливість перебудови маршрутів. По-друге, вона дозволяє врахувати критичні стани системи, коли високі значення одного показника не повинні маскувати провал іншого. По-третє, вона створює підґрунтя для побудови в подальшому математичної моделі оцінювання, у якій буде поєднано фізичну структурну та функціональну стійкість мережі в єдиному аналітичному описі.

Водночас результати дослідження мають і певні обмеження. У межах цієї статті сформульовано саме удосконалену сукупність часткових показників і загальну функціональну залежність їх поєднання, але не виконано повної аналітичної конкретизації функції узагальненого показника для різних сценаріїв бойового застосування. Крім того, у статті не здійснювалося чисельне моделювання впливу окремих факторів

бойової обстановки на значення узагальненого показника. Тому отримані результати слід розглядати як науково обгрунтовану основу для наступного етапу дослідження, а не як завершену методику оцінювання.

Практичне значення результатів полягає в тому, що запропонована система часткових показників може бути використана для більш обгрунтованого оцінювання ефективності функціонування СЗВП, для уточнення підходів до планування архітектури з використанням технології mesh-мереж, а також для вдосконалення оперативно-тактичних розрахунків у процесі організації зв'язку в умовах вогневого та радіоелектронного впливу противника.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналітичне виведення математичної моделі узагальненого показника, визначення форми його агрегування з урахуванням критичних станів мережі, чисельне моделювання для різних сценаріїв бойового застосування, а також на розроблення повної методики оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Висновки

У результаті проведеного дослідження обгрунтовано удосконалену сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж. На відміну від наявних підходів, що переважно орієнтуються на стаціонарні топології або окремі технічні характеристики каналів, запропонована сукупність показників враховує специфіку бойового застосування самоорганізованих мереж і поєднує три базові компоненти: показник доступності, показник зв'язаності та показник якості надання сервісів зв'язку. Саме таке поєднання дає змогу більш повно відобразити ефективність функціонування СЗВП в умовах динамічної зміни топології, втрати елементів мережі та впливу засобів радіоелектронної боротьби.

Наукове значення отриманих результатів полягає в розвитку підходів до оцінювання ефективності функціонування СЗВП шляхом переходу від ізольованого врахування окремих технічних параметрів до комплексного врахування структурних і функціональних властивостей mesh-мереж. Уточнена сукупність часткових показників створює підґрунтя для подальшої побудови математичної моделі та методики оцінювання, здатних урахувати стохастичний характер бойової обстановки, адаптивність мережі та її здатність до самовідновлення.

Важливим результатом дослідження є також те, що всі три часткові показники приведено до єдиної безрозмірної шкали в інтервалі $[0;1]$. Це забезпечує можливість їх узгодженого спільного використання, метричну сумірність та подальшу інтеграцію в узагальнений показник ефективності функціонування СЗВП. Сформульована загальна функціональна залежність такого показника відображає логіку взаємодії між структурною та

функціональною стійкістю мережі й тим самим задає науково обгрунтований напрям наступного етапу досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована система часткових показників може бути використана для кількісного оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж, для обгрунтування рішень щодо побудови та оптимізації архітектури мережі, а також для удосконалення оперативно-тактичних розрахунків у процесі планування організації зв'язку в бойових умовах. Крім того, отримані результати можуть бути корисними під час розроблення підходів до відновлення мережі у реальному часі після порушення її структури або деградації сервісів зв'язку.

Для дослідників, які працюють у цій предметній області, доцільно рекомендувати спрямувати подальші дослідження на аналітичне виведення математичної моделі узагальненого показника, вибір форми агрегування часткових показників з урахуванням критичних станів мережі, а також на проведення чисельного моделювання в різних сценаріях бойового застосування. Наступним логічним кроком є розроблення повної методики оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж на основі запропонованої в цій статті удосконаленої сукупності часткових показників.

Список використаних джерел

- [1.] Center for Strategic and International Studies, "Lessons from the Ukraine Conflict: Modern Warfare in the Age of Autonomy, Information, and Resilience," CSIS. [Онлайн]. Available: <https://www.csis.org/analysis/lessons-ukraine-conflict-modern-warfare-age-autonomy-information-and-resilience>. [Дата звернення: 15.05.2025].
- [2.] G. Giambene, *Queueing Theory and Telecommunications: Networks and Applications*. Boston, MA, USA: Springer, 2005.
- [3.] О. І. Варнаков та С. Г. Галушко, "Оцінка ефективності функціонування телекомунікаційних мереж критичного застосування," Системи обробки інформації, вип. 4(53), с. 20–24, 2006. Доступно: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_4_5
- [4.] V. B. Iversen, "Teletraffic engineering handbook," Jan. 2001, [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf. [Дата звернення: 17.10.2025].
- [5.] О. О. Писарчук, "Оцінка ефективності інформаційних систем за вектором критеріїв," Збірник наукових праць ЖВІ НАУ, вип. 3, с. 117–123, 2010.
- [6.] С. П. Корнієнко та В. П. Корнієнко, "Оцінка ефективності просторово-розподілених телекомунікаційних мереж," Чернігівський науковий часопис. Серія 2: Техніка і природа, № 1(1), с. 132–139, 2011.
- [7.] П. П. Воробієнко, Л. А. Нікітюк та П. І. Резніченко, Телекомунікаційні та інформаційні мережі. Київ,

- Україна: САММІТ-Книга, 2010.
- [8.] І. С. Катеринчук, Р. В. Рачок, Д. А. Мул та О. К. Басараб, “Метод оцінки ефективності функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення,” *Наукоємні технології*, № 1(21), с. 71–74, 2014.
- [9.] A. V. Shyshatskiy et al., “Method of assessment of the efficiency of the communication of operational troop grouping system,” *Сучасні інформаційні системи*, vol. 4, no. 1, pp. 107–112, 2020. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>
- [10.] Україна, Генеральний штаб Збройних Сил України, Наказ № 80: Про затвердження та введення в дію методик розрахунку потреб та основних показників для забезпечення стійкого функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем і мереж Міністерства оборони України та Збройних Сил України, 26 серп. 2020.
- [11.] Д. Г. Шевченко, А. О. Зінченко та І. Ю. Розум, *Комплекси, системи та засоби військових телекомунікаційних мереж*. Київ, Україна: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2019.
- [12.] А. О. Зінченко, О. М. Нестеров та К. А. Зінченко, “До питання пропускнув спроможності як основного показника ефективності функціонування системи військового зв’язку,” *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 2(32), с. 135–140, 2018.
- [13.] Yu. Khazhanets, “Clarification of the set of particular indicators and a generalized indicator for assessing the effectiveness of the functioning of military communications systems,” *The Scientific Heritage*, vol. 3, no. 70, pp. 8–12, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/352e4368-4d9e-491d-b62c-879d2a1e6cde/content>. [Дата звернення: 22.10.2025].
- [14.] ДДП 6-26.22. Настанова “Зі зв’язку Збройних Сил України”. Київ, Україна: ГШ ЗСУ, 2025.
- [15.] Allied Joint Doctrine for Communication and Information Systems, AJP-6. Brussels, Belgium: NATO Standardization Office, 2017.
- [16.] ВСТ 01.112.004-2017(01). Військовий зв’язок та інформаційні системи. Словник НАТО з систем засобів зв’язку та інформаційних систем (AAP-31 (Edition 3), IDT). Київ, Україна: МОУ, 2017.
- [17.] О. Є. Мазулевський та ін., *Система стандартів НАТО із організації роботи системи зв’язку (C4ISR)*. Частина I. Київ, Україна: НУОУ, 2018.
- [18.] Ю. Хажанець та О. Білоус, “Класифікація протоколів маршрутизації mesh-мереж,” *Повітряна міць України*, т. 1, № 6, с. 56–62, 2024, doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62).
- [19.] І. Габідулін, “Аналіз світового досвіду та концептуальні засади розробки вітчизняної системи С2,” *CACDS*. [Онлайн]. Доступно: <https://cacds.org.ua/від-тактичного-зв'язку-до-мережецентру/>. [Дата звернення: 18.10.2025].
- [20.] “В Україні представили mesh-систему зв’язку для наземних роботів без повітряного ретранслятора,” *Defense Express*. [Онлайн]. Доступно: https://defence-ua.com/people_and_company/v_ukrajini_predstavili_mesh_sistemu_zv'язku_dlja_nazemnih_robotiv_bez_povitryanogo_retranslijatora-19149.html. [Дата звернення: 14.06.2025].
- [21.] Б. Кук, “Повітряні операції на базі стільникових мереж. Що змінилося в тактиці й безпеці з 2022 року. Частина 2,” *iPress*, 08 січ. 2026. [Онлайн]. Доступно: https://ipress.ua/articles/povitryani_operatsii_na_bazi_stilnykovykh_merezh_shcho_zminylosya_v_taktytsi_y_bezpechi_z_2022_roku_chastyna_2_bendzhamin_kuk_380759.html. [Дата звернення: 10.01.2026].
- [22.] “Неміфологічні здобутки: українська тактична система зв’язку HIMERA б’є рекорди щодо дальності сигналу радіостанцій,” *АрміяInform*, 27 бер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://armyinform.com.ua/2025/03/27/nemifologichni-zdobutky-ukrayinska-taktychna-systema-zv'язku-himera-bye-rekordy-po-dalnosti-svgnalu-radiostanczij/>. [Дата звернення: 03 квіт. 2025].
- [23.] B. Zhao, M. Wang, W. Lin, et al., “Study on the resilience of command and control networks to cascading failures based on asymmetric group dependencies,” *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 29487, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-14921-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-14921-0).
- [24.] Quality of Service Guaranteed Mechanisms and Performance Model for Public Packet Telecommunication Data Networks, ITU-T Recommendation Y.2617, 2016.
- [25.] Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing, IEEE Std 802.11bf-2025, 2025.
- [26.] IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2017, 2018.
- [27.] О. Барабаш, А. Мусієнко, О. Свинчук та О. Дудкін, “Оцінка ймовірності зв’язності структур інформаційних систем на різних графових моделях,” *Інформаційні технології та суспільство*, № 1(16), с. 281–290, 2025, doi: [10.32689/maup.it.2025.1.37](https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.37).

Oleh Bilous

<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

IMPROVED SET OF PARTIAL INDICATORS FOR PERFORMANCE EVALUATION OF MILITARY COMMUNICATION SYSTEMS USING MESH NETWORKING TECHNOLOGY

This article analyzes scientific and methodological approaches to evaluating the performance of military communication systems using mesh networking technology. It was found that the known approaches do not sufficiently account for the features of self-organizing networks, in particular network availability and connectivity under conditions of dynamic topology changes. An improved set of partial indicators was substantiated, including availability, connectivity, and quality of service indicators, and the logic of their combination in a generalized indicator of system performance was determined.

The proposed system of partial indicators can be used for a more substantiated evaluation of the performance of military communication systems, for refining approaches to architecture planning using mesh networking technology, as well as for improving operational and tactical calculations in the process of communication organization, especially under enemy fire and electronic warfare conditions.

Keywords: *communication system; information and communication system; mesh network; partial indicators; network availability; network connectivity; quality of service.*

References

- [1.] Center for Strategic and International Studies, “Lessons from the Ukraine Conflict: Modern Warfare in the Age of Autonomy, Information, and Resilience,” CSIS. [Online]. Available: <https://www.csis.org/analysis/lessons-ukraine-conflict-modern-warfare-age-autonomy-information-and-resilience>. [Accessed: May 15, 2025].
- [2.] G. Giambene, *Queuing Theory and Telecommunications: Networks and Applications*. Boston, MA, USA: Springer, 2005.
- [3.] O. I. Varnakov and S. H. Halushko, “Evaluation of the Functioning Efficiency of Critical-Use Telecommunication Networks,” *Information Processing Systems*, no. 4(53), pp. 20–24, 2006. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_4_5
- [4.] V. B. Iversen, “Teletraffic Engineering Handbook,” Jan. 2001. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf. [Accessed: Oct. 17, 2025].
- [5.] O. O. Pysarchuk, “Evaluation of Information Systems Efficiency by a Vector of Criteria,” *Collection of Scientific Papers of Zhytomyr Military Institute of the National Aviation University*, no. 3, pp. 117–123, 2010.
- [6.] S. P. Korniienko and V. P. Korniienko, “Evaluation of the Efficiency of Spatially Distributed Telecommunication Networks,” *Chernihiv Scientific Journal. Series 2: Engineering and Nature*, no. 1(1), pp. 132–139, 2011.
- [7.] P. P. Vorobiienko, L. A. Nikitiuk, and P. I. Reznichenko, *Telecommunication and Information Networks*. Kyiv, Ukraine: SAMMIT-Knyha, 2010.
- [8.] I. S. Katerynychuk, R. V. Rachok, D. A. Mul, and O. K. Basarab, “Method for Evaluating the Functioning Efficiency of a Special-Purpose Telecommunication System,” *Science-Intensive Technologies*, no. 1(21), pp. 71–74, 2014.
- [9.] A. V. Shyshatskyi et al., “Method of Assessment of the Efficiency of the Communication of Operational Troop Grouping System,” *Advanced Information Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 107–112, 2020. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>
- [10.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Order No. 80: On Approval and Implementation of Methods for Calculating Needs and Basic Indicators to Ensure the Sustainable Functioning of Information and Telecommunication Systems and Networks of the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine, Aug. 26, 2020.
- [11.] D. H. Shevchenko, A. O. Zinchenko, and I. Yu. Rozum, *Complexes, Systems, and Means of Military Telecommunication Networks*. Kyiv, Ukraine: Ivan Cherniakhovskiy National Defense University of Ukraine, 2019.
- [12.] A. O. Zinchenko, O. M. Nesterov, and K. A. Zinchenko, “On Throughput as the Main Indicator of the Functioning Efficiency of a Military Communication System,” *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense*, no. 2(32), pp. 135–140, 2018.
- [13.] Yu. Khazhanets, “Clarification of the Set of Particular Indicators and a Generalized Indicator for Assessing the Effectiveness of the Functioning of Military Communications Systems,” *The Scientific Heritage*, vol. 3, no. 70, pp. 8–12, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/352e4368-4d9e-491d-b62c-879d2a1e6cde/content>. [Accessed: Oct. 22, 2025].
- [14.] Guideline “On Communications of the Armed Forces of Ukraine”, DDP 6-26.22. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2025.
- [15.] Allied Joint Doctrine for Communication and Information Systems, AJP-6. Brussels, Belgium:

- NATO Standardization Office, 2017.
- [16.] Military Communications and Information Systems. NATO Glossary of Communications and Information Systems (AAP-31 (Edition 3), IDT), VST 01.112.004-2017(01). Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, 2017.
- [17.] O. Ye. Mazulevskiy et al., NATO Standards System for Organizing the Operation of the Communication System (C4ISR). Part I. Kyiv, Ukraine: NDUU, 2018.
- [18.] Yu. Khazhanets and O. Bilous, "Classification of Mesh Network Routing Protocols," *Air Power of Ukraine*, vol. 1, no. 6, pp. 56–62, 2024, doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62).
- [19.] I. Habidulin, "Analysis of Global Experience and Conceptual Foundations for Developing a National C2 System," *CACDS*. [Online]. Available: <https://cacds.org.ua/vid-taktychnogo-zv'язku-do-merezeцentru/>. [Accessed: Oct. 18, 2025].
- [20.] "A Mesh Communication System for Ground Robots Without an Airborne Relay Was Presented in Ukraine," *Defense Express*. [Online]. Available: <https://defence-ua.com/people-and-company/v-ukrajini-predstavil-i-mesh-sistemu-zv'язku-dlja-nazemnih-robotiv-be-z-povitrjanogo-retransljatora-19149.html>. [Accessed: Jun. 14, 2025].
- [21.] B. Cook, "Cellular-Based Air Operations. What Has Changed in Tactics and Security Since 2022. Part 2," *iPress*, Jan. 08, 2026. [Online]. Available: https://ipress.ua/articles/povitryani-operatsii-na-b-azi-stilnykovyh-merezh-shcho-zminylosya-v-taktyt-si-y-bezpetsi-z-2022-roku-chastyna-2__bendzha-min-kuk_380759.html. [Accessed: Jan. 10, 2026].
- [22.] "Non-Mythological Achievements: The Ukrainian Tactical Communication System HIMERA Sets Records for Radio Signal Range," *ArmyInform*, Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://armyinform.com.ua/2025/03/27/nemifologich-ni-zdobutky-ukrayinska-taktychna-systema-zv'язku-himera-bye-rekordy-po-dalnosti-sygnalu-radiostancij/>. [Accessed: Apr. 03, 2025].
- [23.] B. Zhao, M. Wang, W. Lin, et al., "Study on the Resilience of Command and Control Networks to Cascading Failures Based on Asymmetric Group Dependencies," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 29487, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-14921-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-14921-0).
- [24.] Quality of Service Guaranteed Mechanisms and Performance Model for Public Packet Telecommunication Data Networks, ITU-T Recommendation Y.2617, 2016.
- [25.] Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing, IEEE Std 802.11bf-2025, 2025.
- [26.] IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2017, 2018.
- [27.] O. Barabash, A. Musiienko, O. Svychnuk, and O. Dudkin, "Assessment of the Probability of Connectivity of Information System Structures Under Different Graph Models," *Information Technologies and Society*, no. 1(16), pp. 281–290, 2025, doi: [10.32689/maup.it.2025.1.37](https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.37).