УДК 621.39:623.1/.7

М. В. Сухотеплий, О. С. Гота

ПІДВИЩЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ТАКТИЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЗА РАХУНОК РОЗГОРТАННЯ САМООРГАНІЗОВАНИХ MESH-ТОПОЛОГІЙ

***Анотація**: Розглянуто збереження боєздатності тактичної системи управління при вогневому та радіоелектронному ураженні окремих вузлів зв'язку. Показано, що ієрархічна схема з виділеними ретрансляторами має критичні вузли, втрата яких відсікає від управління цілі ділянки. Запропоновано розгортати самоорганізовану MESH-топологію та оцінювати живучість часткою абонентів, які зберігають зв'язок із пунктом управління. Моделювання показало, що при прицільному ураженні чотирьох вузлів ієрархічна схема втрачає зв'язок з усіма абонентами, а MESH-мережа зберігає його для 98,9 % абонентів.*

***Ключові слова**: тактична система управління, живучість, MESH-топологія, радіоелектронна боротьба, вузол зв'язку.*

***Abstract**: Preserving the combat capability of a tactical command and control system under kinetic and electronic attack on individual communication nodes is considered. It is shown that a hierarchical scheme with dedicated relays contains critical nodes whose loss cuts entire sections off from command. Deploying a self-organizing MESH topology is proposed, with survivability assessed as the share of subscribers that keep a connection to the command post. Simulation shows that when four nodes are deliberately destroyed, the hierarchical scheme loses connection with all subscribers, while the MESH network keeps it for 98.9 % of them.*

***Keywords**: tactical command and control system, survivability, MESH topology, electronic warfare, communication node.*

Досвід бойових дій свідчить, що боєздатність підрозділу сьогодні визначається не лише вогневими можливостями, а й тим, чи вдається зберегти управління після перших втрат. Вузли зв'язку стають пріоритетними цілями як для вогневого ураження, так і для засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). У класичній ієрархічній схемі кожен абонент замкнений на свій ретранслятор, тому втрата одного такого вузла залишає без управління всю підлеглу ланку, навіть якщо самі підрозділи цілі. Тож завдання полягає в тому, щоб відмова окремого вузла не переростала у втрату управління.

Сучасні військові системи управління дедалі частіше будують на самоорганізованих багатохопових мережах типу MANET [1]. У військовому контексті цей термін близький за змістом до MESH-мережі: кожна станція водночас є абонентом і ретранслятором, а головного вузла, через який іде весь трафік, немає [2, 3]. Автори [1] пропонують розглядати таку мережу як динамічний граф і оцінювати її стійкість за сукупністю показників зв'язності, надійності та своєчасності доставки повідомлень.

Нехай систему зв'язку подано графом $G = (V, E)$, де V - вузли (пункт управління, ретранслятори, абонентські станції), E - радіолінії між ними. Вогневе ураження вузла означає видалення відповідної вершини, а дія РЕБ у зоні придушення - видалення всіх вершин, що до неї потрапили. Живучість визначимо як частку абонентів, які після ураження зберігають зв'язок із пунктом управління:

$$Ж = \frac{n_з}{n_а} \qquad (1)$$

де $n_з$ - кількість абонентів, що мають шлях до пункту управління; $n_а$ - кількість абонентів, що залишилися непошкодженими.

З теорії графів відомо, що граф із вершинною зв'язністю κ залишається зв'язним після видалення будь-яких $\kappa - 1$ вершин [5]. В ієрархічній схемі $\kappa = 1$, бо кожен ретранслятор є точкою відмови. У MESH-топології зв'язність зростає зі щільністю розміщення станцій; щоб мережа витримувала втрату одного вузла, достатньо $\kappa \geq 2$.

Для порівняння виконано імітаційне моделювання. Район 6 × 6 км, 25 вузлів: пункт управління, 4 ретранслятори та 20 абонентів. Радіус зв'язку для обох схем узято 2,2 км - мінімальний, за якого базова ієрархічна схема працює. В ієрархічній схемі абонент пов'язаний

лише зі своїм ретранслятором, у MESH-топології - з усіма вузлами в зоні досяжності (у середньому 7 сусідів). Розглянуто випадкове та прицільне ураження k вузлів (послідовно уражається вузол із найбільшою кількістю зв'язків), а також зону РЕБ радіусом 1,5 км у випадковому місці. Для кожного сценарію виконано 20 000 реалізацій. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Частка абонентів, що зберегли зв'язок із пунктом управління, %

Сценарій ураження	**Ієрархічна схема**	**MESH-топологія**
Випадкове ураження 4 вузлів	83,4	99,6
Прицільне ураження 2 вузлів	50,0	99,9
Прицільне ураження 4 вузлів	12,6	98,9
Зона РЕБ радіусом 1,5 км	89,3	98,5

Розрахунок показує, що слабке місце ієрархічної схеми - не нестача потужності, а наявність критичних вузлів: противнику достатньо знайти ретранслятори. У MESH-мережі такої обов'язкової цілі немає. Результат одержано для ідеалізованої моделі (дискова зона радіозв'язку, без урахування пропускної здатності та взаємних завад), тому на практиці виграш буде меншим.

Окремо слід враховувати демаскування, адже випромінюючу MESH-станцію можна запеленгувати. Сучасні радіостанції мають засоби протидії: у Silvus StreamCaster це динамічне зниження потужності до мінімально необхідної (MAN-PC), автоматичний перехід мережі на найчистіший канал при появі завади (MAN-IA) та придушення завади просторовою обробкою сигналу (MAN-IC) [4]. Проте частина цих функцій поширюється за ліцензіями, а окремі доступні лише замовникам уряду США або підлягають експортному контролю [4], тому склад функцій конкретного виробу слід уточнювати ще під час закупівлі.

З огляду на викладене пропонується планувати зв'язок так, щоб кожна станція мала в зоні досяжності не менше двох-трьох сусідів ($\kappa \geq 2$); розносити ретранслятори, зокрема на безпілотних літальних апаратах, і обмежувати потужність; дублювати вихід до вищого рівня управління окремим каналом; заздалегідь готувати типові схеми й шаблони налаштувань та навчати зв'язківців.

Отже, розгортання самоорганізованих MESH-топологій дозволяє зберегти боєздатність системи управління при втраті окремих вузлів зв'язку, чи то від вогню, чи то від РЕБ, а головна умова - достатня щільність станцій і дисципліна випромінювання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування пропускної здатності та реальних умов поширення сигналу.

Список використаних джерел:

1. Іохов О. Ю., Білаш О. О. Оцінювання стійкості mesh-мережі системи управління безпілотними системами в умовах дії засобів РЕБ. Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2025. № 2 (46). С. 33-39. https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/2/46/352559.

2. Corson S., Macker J. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. RFC 2501. IETF, 1999. https://doi.org/10.17487/RFC2501.

3. Akyildiz I. F., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: a survey. Computer Networks. 2005. Vol. 47, No. 4. P. 445-487.

4. Spectrum Dominance 2.0 Capabilities Profile. Silvus Technologies, 2025. URL: https://silvustechnologies.com/wp-content/uploads/2025/06/Spectrum-Dominance-2.0-Capabilites-Profile.pdf (дата звернення: 14.10.2026).

5. Diestel R. Graph Theory. 5th ed. Berlin : Springer, 2017. 428 p. (Graduate Texts in Mathematics ; 173).

Гота Олексій Сергійович *- курсант 443 навчальної групи, факультету автоматизованих систем управління та назменого забезпеечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, oleksiyhota@gmail.com, ORCID iD: 0009-0000-0050-2500*

Сухотеплий Владислав Миколайович *- старший викладач, кафедри радіоелектронних систем пунктів управління Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, : vladislav181168@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-2566-4167*

Hota Oleksii Serhiiovych *- cadet of the 443rd study group, Faculty of Automated Control Systems and Aviation Ground Support, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, oleksiyhota@gmail.com, ORCID iD: 0009-0000-0050-2500*

Sukhoteplyi Vladyslav Mykolaiovych *- Senior Instructor, Department of Radioelectronic Systems of Control Points of Air Forces, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, vladislav181168@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-2566-4167*