



АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ МОДУЛЬНОЇ АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Л. Озірковський [ORCID: 0000-0003-0012-2908], Н. Гоц [ORCID: 0000-0003-2666-2187], Р. Кочан [ORCID: 0000-0003-1254-1982],
Н. Приймак [ORCID: 0009-0000-7816-2497], Ю. Жук [ORCID: 0009-0004-4840-2954]

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Леонід Озірковський (e-mail: : leonid.d.ozirkovskyi@lpnu.ua).

(Подано 1 вересня 2025)

У дослідженні проаналізовано показник структурної живучості системи спеціального призначення – ймовірність парної зв’язності. Об’єктом дослідження є модульна акустична система моніторингу повітряного простору. Як метод моделювання застосовано удосконалений метод логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання. Отримано кількісні значення показника живучості за різних варіантів зовнішнього ураження каналів зв’язку проектованої системи на етапі системотехнічного проектування, коли самої системи ще немає в “залізі”. Сучасні системи моніторингу повітряного простору є важливими елементами інформаційно-комунікаційних систем, що застосовують як складові комплексів протиповітряної оборони, критично важливої інфраструктури. Ефективність функціонування таких комплексів істотно залежить від їхньої структурної живучості, тобто здатності зберігати працездатність у випадку часткового пошкодження елементів або каналів зв’язку. Забезпечення високих показників живучості – актуальне науково-прикладне завдання, оскільки навіть тимчасова втрата інформаційної стійкості може призвести до істотного зниження ефективності системи загалом. Особливістю досліджуваної системи є використання модульної структури, у якій поєднуються централізовані стаціонарні GSM-вузли та децентралізована сіткова мережа на основі розумних акустичних давачів, що взаємодіють між собою за технологією LoRa. Така архітектура системи забезпечує масштабованість і гнучкість збирання та передавання даних, однак водночас породжує додаткові вимоги до оцінювання надійності мережевої структури та пошуку оптимальних рішень на етапі системотехнічного проектування. Для кількісного аналізу структурної живучості модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору використовують методи моделювання, які дають змогу оцінити ймовірність збереження зв’язності між критичними вузлами за різних умов. У цій роботі застосовано удосконалений метод логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання, що забезпечує можливість визначення показників живучості на ранніх етапах проектування, коли систему ще не реалізовано у вигляді апаратних засобів. Це дає змогу своєчасно виявити вразливі місця топології, порівняти альтернативні варіанти архітектури та обґрунтувати рішення щодо підвищення надійності та стійкості системи.

Ключові слова: живучість, моніторинг повітряного простору, акустична система, ймовірність парної зв’язності, сіткова мережа зв’язку.

УДК: 621.126

Вступ

Проблема захисту від засобів повітряного нападу особливо актуальна під час війни. В Україні її вирішують війська протиповітряної оборони (ППО), що складаються із зенітно-ракетних військ (ЗРВ) [1] та радіотехнічних військ (РТВ) [2]. РТВ повинні забезпечити ведення розвідки повітряного простору. Розвідувальну інформацію використовують для попередження населення, цілевказання: ЗРВ, винищувальній авіації [3], іншим задіяним підрозділам.

Дальність виявлення маловисотних цілей з малою ефективною площею розсіяння (ЕПР) для радіолокаційних станцій (РЛС), що перебувають на озброєнні РТВ, не перевищує 40 км [4]. Крім того, РЛС – це складні технічні засоби, як для виробництва, так і в експлуатації. Їх легко виявити засобами радіоелектронної розвідки (РЕР) [5]. Тому їхня кількість та особливості застосування не дають змоги сформувати суцільне радіолокаційне поле для виявлення та супроводження маловисотних цілей [6].

В арміях країн НАТО та росії проблему виявлення маловисотних цілей вирішують за допомогою літаків дальнього радіолокаційного стеження AWACS [7] та A50 відповідно. Україна не має таких засобів, тому вже під час широкомасштабного вторгнення були розроблені і прийняті в дослідну експлуатацію системи, призначені для доповнення інформації РЛС:

- Додатки для мобільних пристроїв «ППО» [8] та «Ракета» [9], що забезпечують автоматичне передавання командуванню ППО геолокації мобільного пристрою, власник якого візуально виявив ціль, що не дає змоги гарантувати її виявлення.

- Система “Звук” [10], яка складається з множини автоматичних акустичних приймачів, що виявляють наявність цілі, аналізуючи акустичні сигнали їхніх двигунів, і передають це командуванню. Дальність їхньої дії – 3–7 км залежно від типу цілі.

Ці системи, фактично, являють собою розподілені мережі з напівавтоматичним або автоматичним режимом роботи. У них є недолік: вони не визначають кількісних характеристик траєкторії цілі (координати, висоту, напрям руху), а лише детектують її наявність в радіусі дії приймачів, у випадку додатків «ППО» та «Ракета» – власників мобільних пристроїв, тобто похибка визначення координат цілей дорівнює дальності дії сенсорів. Це значення кратно перевищує ефективну дальність ураження зенітних кулеметів, якими озброєні мобільні вогневі групи ППО [11], тому актуальним є розроблення та впровадження точніших засобів виявлення та моніторингу маловисотних цілей.

У цьому контексті перспективним є створення системи акустичного моніторингу повітряного простору, що поєднує GSM-вузли та сіткову мережу розумних акустичних давачів на основі технології LoRa. Така архітектура дає змогу підвищити точність та достовірність виявлення цілей завдяки багатоканальному збиранню даних, проте необхідне оцінювання її надійності й здатності зберігати працездатність у разі часткового виходу з ладу каналів зв’язку. Саме тому важливим завданням є виконання кількісного аналізу структурної живучості розроблюваної системи на етапі системотехнічного проектування. Для цього доцільно застосувати метод логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання [12], що дає змогу оцінити роботу системи ще до її реалізації в апаратному вигляді. Розглянемо суть методу. Для мережі зв’язку із сітковою структурою формується топологічний граф. На топологічному графі визначають всі прості маршрути між початковим і кінцевим вузлами. Ці маршрути слугують траєкторіями, на яких за певними правилами [12] здійснюється формування ймовірнісних пакетів. Кожна траєкторія складається з вузлів та гілок топологічного графа. Ймовірнісним пакетом називають вираз, який komponується із ймовірностей успішного і неуспішного проходження пройдених гілок траєкторії та наступної її гілки. Траєкторії можуть мати спільні гілки. Ймовірнісні пакети, які доходять до кінцевого вузла топологічного графа, являють собою вирази, призначені для визначення показника структурної живучості – “ймовірність парної зв’язності”.

2. Особливості структури та алгоритму поведінки модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору за несприятливих зовнішніх дестабілізувальних дій

Пропонована система, зважаючи на низьку складність реалізації акустичних методів, порівняно з радіолокаційними, а також їх пасивність, що забезпечує захист від засобів РЕР, аналогічно до системи “Звук”, ґрунтується на виявленні цілей за аналізом генерованих ними акустичних сигналів [13]. Пропонована система складається із множини розумних акустичних давачів (РАД), підключених до сервера за допомогою каналів безпроводного зв’язку. Розумні акустичні давачі складаються з акустичних сенсорів, вимірювальних та обчислювальних засобів і забезпечують автоматичні: топогеодезичну прив’язку, виявлення та класифікацію цілей, вимірювання їх азимуту і кута місця. Топогеодезична прив’язка РАД забезпечується використанням супутникових навігаційних сенсорів. Для виявлення та класифікації цілей використовують методи штучного інтелекту, а його навчання ґрунтується на виділенні спеціальних фрагментів відео- та аудіозаписів, розміщених у соціальних мережах та сервісах відеохостингу, що забезпечує формування навчальної вибірки. Вимірювання азимуту та кута місця цілей здійснюється з використанням ефекту фазової стереофонії. Виміряні значення РАД передають серверу, який здійснює агрегацію даних. Результати роботи системи в реальному часі сервер надає за допомогою електронної карти з авторизованим доступом. Якщо ціль виявили принаймні два РАД, сервер розраховує географічні координати та висоту цілі як точку перетину (мінімум відстані, з урахуванням похибок вимірювання) двох променів, що виходять із точок з координатами РАД і скеровуються у напрямку виміряних азимутів та кутів місця. Це забезпечує можливість точнішого вимірювання географічних координат цілей, додатково – їх висоти. Використання каналів мобільного зв’язку для передавання інформації забезпечує гнучкість системи щодо розміщення РАД. Їхня очікувана площа покриття співмірна із площею покриття приймачів системи “Звук”.

Модель модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору [14] у вигляді топологічного графа подано на рис. 1. Центр керування, позначений номером 1, здійснює інформаційний обмін із GSM-вузлами (номери вузлів 2–7) та забезпечує централізоване опрацювання даних і координацію функціонування всієї системи.

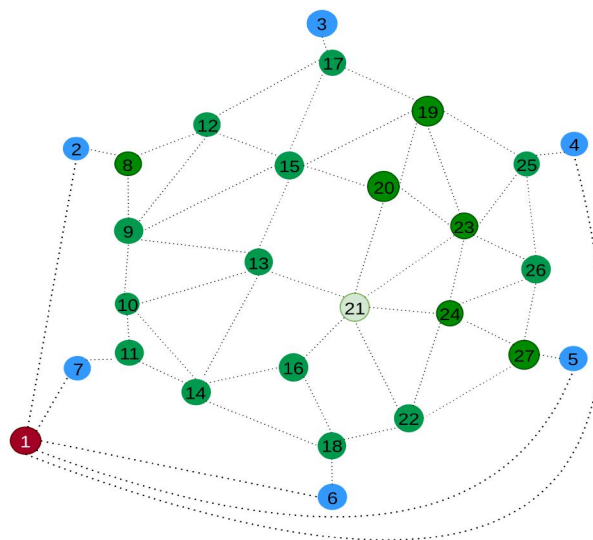


Рис. 1. Топологічний граф моделі (M1) модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору (всі лінії зв'язку справні)

У складі комплексу застосовують розумні акустичні давачі (номери вузлів 8–27), які формують сіткову (mesh) мережу на основі технології LoRa. Така топологія дає змогу забезпечити багатоканальну маршрутизацію сигналів, що підвищує стійкість мережі до відмов окремих вузлів і сприяє зменшенню ймовірності втрати даних. Крайні акустичні давачі інтегрують сіткову мережу з GSM-вузлами, виконуючи роль шлюзів доступу до глобальної мережевої інфраструктури.

Запропонована архітектура поєднує переваги енергоефективної технології LoRa для локального збирання даних із широкосмуговими можливостями GSM-мережі для їх передавання на віддалений центр керування. Це забезпечує масштабованість, надійність та живучість функціонування системи в умовах реального часу, а також підвищує ефективність моніторингу наземної обстановки за рахунок гнучкого поєднання централізованих і децентралізованих підходів до опрацювання інформації.

3. Дослідження показників структурної живучості моделі модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору.

Живучість системи розглядається як здатність системи зберігати працездатність у разі втрати працездатності частини каналів зв'язку. Кількісна оцінка живучості критично важлива для проектування розподілених систем критичного призначення. Для цього на системотехнічному етапі проектування потрібно мати кількісні значення показника структурної живучості, а саме "ймовірність парної зв'язності". Цей показник дає змогу здійснювати порівняльний аналіз різних варіантів топологій мереж зв'язку, щоб виявити найстійкіші до руйнівних дій конфігурації сіткової структури.

Застосування показника живучості мережі зв'язку (ймовірність парної зв'язності) особливо важливе, коли система функціонує в умовах підвищеного ризику – наприклад, у військових системах чи комплексах, де втрата навіть частини каналів зв'язку може істотно знизити ефективність роботи системи. Такий підхід дає змогу оцінити, наскільки надійно зберігатиметься можливість інформаційного обміну між ключовими елементами системи навіть у разі цілеспрямованих атак чи технічних збоїв.

Крім того, наявність формалізованої кількісної оцінки дає змогу проєктувальникам систем здійснити оптимізацію конфігурацій на етапах системотехнічного проєктування через багатоваріантний аналіз, що суттєво зменшує витрати на розроблення і подальшу модернізацію та підвищує загальну надійність системи. Завдяки цьому можливо швидко визначити найефективніші архітектурні рішення, уникнути надлишкових витрат ресурсів та підвищити рівень готовності системи до роботи в екстремальних умовах.

Використання показника структурної живучості також відкриває можливості для побудови адаптивних мереж, які здатні перебудовувати свою конфігурацію у реальному часі залежно від ступеня ушкоджень. У таких системах важливим завданням стає не тільки збереження працездатності, але й мінімізація часу відновлення зв'язності, що прямо впливає на ефективність виконання критичних завдань.

Отже, застосування методів кількісної оцінки структурної живучості дає змогу не лише оцінювати поточний стан мережі, але й прогнозувати її поведінку в умовах деградації, визначати критичні вузли та формувати рекомендації щодо підвищення структурної стійкості системи. Це, своєю чергою, створює передумови для розроблення систем із високим рівнем відмовостійкості, що здатні забезпечувати безперервність функціонування навіть у випадку значних пошкоджень мережевої інфраструктури. Наприклад, у телекомунікаційних системах управління військовими операціями показник ймовірності парної зв'язності може стати вирішальним для вибору конфігурації мережі чинником, оскільки гарантує стійкість комунікацій між командними пунктами.

В енергетичних мережах цей підхід допомагає забезпечити стабільність роботи систем передавання даних в разі аварійного відключення підстанцій. А в авіаційних комплексах зв'язку він дає змогу прогнозувати наслідки виходу з ладу каналів зв'язку та заздалегідь формувати резервні маршрути обміну даними.

Канали зв'язку на топологічному графі представлені гілками. Ймовірність існування кожної гілки відповідає ймовірності неперервної безвідмовної роботи відповідного каналу зв'язку, яка для заданої тривалості експлуатації мережі повинна дорівнювати 0,9 та 0,99 (у нашому дослідженні розглянемо дві моделі). До вузлів топологічного графа мережі зв'язку "підключені" РАД, взаємодію між якими забезпечує мережа зв'язку. В цьому дослідженні ймовірності існування вузлів топологічного графа дорів-

нують одиниці. Згідно із методом логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання парна зв'язність між центром управління (вузол 1) та розумним акустичним давачем 21 для моделі М1 (рис. 1) дорівнює 0,86565, коли ймовірність безвідмовної роботи каналів зв'язку невисока і дорівнює 0,9.

На рис. 2 зображено модель М2 радіоелектронного комплексу моніторингу наземної обстановки у вигляді топологічного графа, коли частина ліній зв'язку пошкоджена і немає доступу до семи розумних акустичних давачів (номери 13, 15, 16, 18, 20, 22, 23).

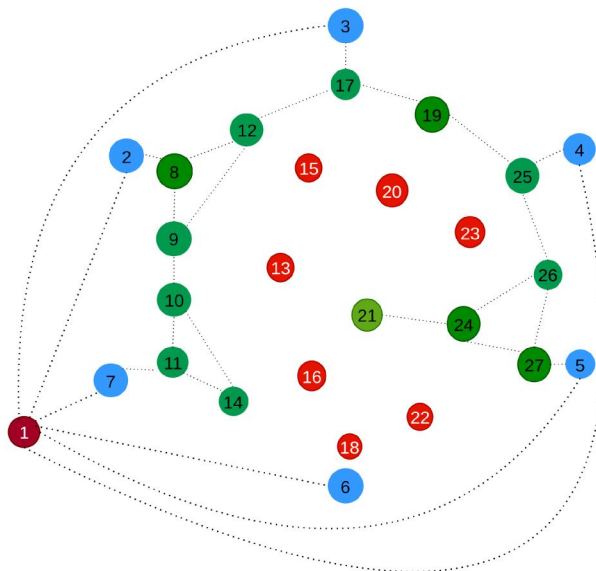


Рис. 2. Топологічний граф моделі (М2) модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору (частина ліній зв'язку пошкоджена і немає доступу до семи розумних акустичних давачів)

На рис. 3 зображено модель М3 модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору у вигляді топологічного графа коли частина ліній зв'язку пошкоджена і існує тільки один простий шлях між 1 та 21 вузлами.

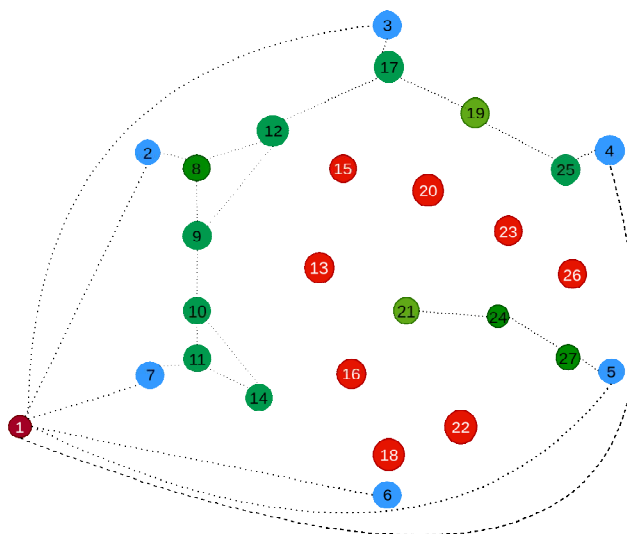


Рис. 3. Топологічний граф моделі (М3) модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору (частина ліній зв'язку пошкоджена, є тільки один простий шлях між 1 та 21 вузлами)

Це означає, що система втрачає властивість багатозв'язності, яка забезпечувала її стійкість у попередніх моделях. За таких умов відмова будь-якого каналу на єдиному доступному маршруті призведе до повної втрати інформаційного обміну між центром управління та віддаленим акустичним давачем. Отже, мережа опиняється в критичному стані, коли її живучість безпосередньо залежить від надійності лише однієї послідовності каналів.

Модель М3 корисна для аналізу "гіршого сценарію", що дає змогу оцінити мінімальний рівень структурної стійкості системи за масштабних пошкоджень мережевої інфраструктури.

Після визначення ймовірності парної зв'язності для моделей М1, М2 та М3 за умови ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку, яка є невисокою і дорівнює 0,9 доцільно розглянути випадок істотного підвищення надійності каналів зв'язку. Тому далі обчислимо відповідні показники для тих самих моделей у разі, коли ймовірність безвідмовної роботи каналів зв'язку висока і становить 0,99. Це дасть змогу порівняти результати та проаналізувати вплив підвищення надійності каналів на загальну живучість системи. Отримані результати зведемо у таблицю для наочності та зручності подальшого аналізу.

Ймовірність парної зв'язності між 1 та 21 вузлами

Назва моделі	Ймовірність безвідмовної роботи каналів зв'язку	К-сть простих шляхів	Час обчислення, год:хв:с	Ймовірність парної зв'язності між 1 та 21 вузлами
М1	0.9	142276	05:12:38	0.86565
М2		18	00:00:01	0.78528
М3		1	00:00:01	0.6561
М1	0.99	142276	05:16:29	0.98966
М2		18	00:00:01	0.9798
М3		1	00:00:01	0.9606

Висновки

У дослідженні проаналізовано показник структурної живучості модульної акустичної системи моніторингу повітряного простору – ймовірність парної зв'язності. Для цього змодельовано три варіанти системи – М1, М2 та М3 із різними умовами працездатності каналів зв'язку за ймовірності їх безвідмовної роботи 0,9 та 0,99. Модель М1 відображає топологічний граф комплексу за умови справності всіх ліній зв'язку. Модель М2 відповідає випадку пошкодження частини каналів, що призвело до втрати доступу до семи розумних акустичних давачів. Модель М3 демонструє критичний сценарій, коли через пошкодження зв'язків між вузлом 1 та вузлом 21 залишається лише один простий шлях.

Результати аналізу показали, що кількість простих шляхів між вузлом 1 та вузлом 21 різко зменшується із переходом від М1 до М3: у моделі М1 вона становить 142 276, у моделі М2 – 18, а в моделі М3 – лише 1. За невисокого значення ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку системи, яке становить 0,9, отримано значення ймовірності парної зв'язності 0,86565 для М1, 0,78528 для М2 та 0,6561 для М3. За умови істотного підвищення ймовірності безвідмовної роботи каналів зв'язку до 0,99 відповідні показники зростають до 0,98966 для М1, 0,9798 для М2 та 0,9606 для М3.

Отже, результати моделювання підтверджують, що збільшення ймовірності безвідмовної роботи окремих каналів істотно підвищує загальну живучість системи навіть якщо пошкоджено частину зв'язків. Водночас вплив структури мережі визначальний: у повнозв'язній моделі М1 спо-

стерігається найбільший запас живучості, тоді як у моделі МЗ функціонування комплексу підтримується лише за рахунок єдиного простого шляху. Це підкреслює необхідність урахування топологічних характеристик під час системотехнічного проектування та оптимізації архітектури таких мереж для забезпечення їх високої надійності та живучості. Ймовірність парної зв'язності визначено формалізованим методом логіко-ймовірнісного траєкторного моделювання. Цей метод є подальшим розвитком методу комутації ймовірнісних пакетів, який розробили автори.

Подяка

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт No 2023.04/0116 “Модульна акустична система моніторингу повітряного простору” за конкурсом “Наука для зміцнення обороноздатності України”.

Список використаних літературних джерел

- [1] Волювач, С. & Воронін, В. & Рисований, О. & Третяк, В. & Балакірева, С. (2024). Удосконалення підходів щодо оцінювання показників живучості підрозділів зенітних ракетних військ. *Системи озброєння і військова техніка*, 81–86. 10.30748/soivt.2024.77.11.
- [2] Попов, Сергій & Юфа, Євген & Салій, Анатолій & Цибанюк, Тетяна (2025). Основні положення методики оцінювання ефективності управління відновленням радіоелектронної техніки радіотехнічних військ. *Повітряна міць України*, 1, 17–22. 10.33099/2786-7714-2025-1-8-17-22.
- [3] Ярош, С. П. & Грищенко, П. М. (2024). Дослідження світового досвіду формування парків ударної авіації. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*, 54–63. 10.30748/nitps.2024.55.06.
- [4] Климченко, В. Й., Дончак, Д. А., Донченко, М. М., & Тютюнник, В. О. (2021). Проблеми набуття спроможностей радіотехнічних військ з розвідки перспективних засобів повітряного нападу. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*, (3 (44)), 108–115.
- [5] Туниця, І. М. & Кривонос, В. М. & Василенко, Р. В. & Галєпа, О. Г. & Штанько, В. А. (2025). Концепція інтеграції сучасних прогресивних технологій в систему формування та обробки даних повітряної розвідки. *Системи обробки інформації*, 81–88. 10.30748/soi.2025.180.09.
- [6] Климченко, В. Й. & Тютюнник, В. О. & Тах'ян, К. А. & Рибалка, Г. В. (2024). Методика визначення можливостей оглядових радіолокаторів з виявлення малопомітних маловисотних літальних апаратів. *Системи озброєння і військова техніка*, 69–76. 10.30748/soivt.2024.79.08.
- [7] Wang, Bo & Wang, Gang & Yang, Rengnong & Li, Yonglin & Zhao, Yu. (2025). Research on methods to enhance the survivability of AWACS with FDA against anti-ARMs on a battlefield. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 19. 10.1049/mia2.12541.
- [8] <https://eppoua.com/>
- [9] <https://eraketa.com/>
- [10] <https://armyinform.com.ua/2023/01/23/lvivski-teroboronczy-rozrobyly-systemu-zvuk/>
- [11] <https://molfar.com/blog/shahed-upd-2>
- [12] L. Ozirkovskyy, Y. Zhuk, B. Volochiy and N. Prymak, “Determination of Survivability Indicator of Unmanned Aerial Vehicle Acoustic Detection System”, 2024 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 2024, pp. 605–609. DOI: 10.1109/ACIT62333.2024.10712562.
- [13] O. Siechko, A. Kitsera, R. Kochan, J. Józwiak, A. Tofil and D. Mika, “Acoustic Signal Analysis of the Targets of Distributed Airspace Monitoring System”, 2024 11th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Lublin, Poland, 2024, pp. 52–56. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace61015.2024.10591580.
- [14] R. Kochan et al., “Approach to Acoustic Drone Detection System Development”, 2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Dortmund, Germany, 2023, pp. 471–476. DOI: 10.1109/IDAACS58523.2023.10348897

ANALYSIS OF STRUCTURAL SURVIVABILITY INDICATORS FOR MODULAR ACOUSTIC AIRSPACE MONITORING SYSTEM

Leonid Ozirkovskyy, Natalia Hots, Roman Kochan, Nazar Pryymak, Yuriy Zhuk

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

In this study, the structural survivability indicator – pairwise connectivity probability – was analyzed. The research object is a modular acoustic airspace monitoring system. As the modeling method, an improved logic-probabilistic trajectory modeling approach was applied. Quantitative survivability values were obtained at the system-engineering design stage, when the system does not yet exist in hardware, by means of modeling. Modern airspace monitoring systems are critical components of information and communication systems, parts of air defense complexes and critical infrastructure. The effectiveness of such complexes largely depends on their structural survivability, i. e., the ability to maintain operability in the event of partial damage to elements or communication channels. Ensuring high survivability indicators is a relevant scientific and applied challenge, since even temporary loss of informational resilience may significantly reduce the overall effectiveness of the complex. A distinctive feature of the studied system is the use of a modular structure that combines centralized stationary GSM nodes with a decentralized mesh network based on smart acoustic sensors communicating via LoRa technology. Such a system design provides scalability and flexibility in data collection and transmission, while at the same time imposing additional requirements for assessing network reliability and identifying optimal solutions at the system-engineering design stage. For quantitative analysis of the structural survivability of the modular acoustic airspace monitoring system, modeling methods are applied to evaluate the probability of preserving connectivity between critical nodes under different conditions. In this work, an improved logic-probabilistic trajectory modeling method was employed, enabling the determination of survivability indicators already at the early stages of design, when the system is not yet implemented in hardware. This makes it possible to identify vulnerabilities in the topology in a timely manner, compare alternative architecture options, and substantiate decisions aimed at improving the reliability and resilience of the system.

Keywords: *survivability, airspace monitoring, acoustic system, probability of pairwise connectivity, grid communication network, LoRa mesh networks.*