

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ С. П. КОРОЛЬОВА

**ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ,
ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ
СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

30

Житомир
2026

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 30 / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2026. – 252 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2026.30>

Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.06.2026 № 928 збірник наукових праць включений у категорію «Б» Переліку наукових фахових видань України в межах кластеру «Національна безпека та оборона» за спеціальностями: К4, К6, К7, F5.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, протокол № 12 від 21.05.2026.

Головний редактор – ПІЛЬКЕВИЧ І. А., заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

Відповідальний секретар – СТАВІСЮК Р. Л., кандидат технічних наук, старший дослідник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

Члени редакційної колегії:

ГРИЩУК Р. В., заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор (Військова академія (м. Одеса), Україна);

ЖУРАВСЬКИЙ Ю. В., доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Державний університет «Житомирська політехніка», Україна);

КАНЕВСЬКИЙ Л. Б., кандидат технічних наук, доцент (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

КОВБАСЮК С. В., лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Україна);

МОСОВ С. П., заслужений діяч науки і техніки України, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор військових наук, професор (Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна);

ПЕРЕГУДА О. М., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

РОМАНЧУК М. П., кандидат технічних наук, старший дослідник (Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Україна);

САМЧИШИН О. В., кандидат технічних наук, старший дослідник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

ФЕДОРЧУК Д. Л., кандидат технічних наук, старший дослідник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

ФРИЗ С. П., заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

HLAVIZNA Petr, Ph. D., University of Defence, Czech Republic;

VLANA Martin, Ph. D., Assoc. Prof., University of Defence, Czech Republic;

ZEZULA Jan, Ph. D., University of Defence, Czech Republic;

ŠUSTR Michal, Ph. D., University of Defence, Czech Republic;

DUBEC Branislav, Ph. D., University of Defence, Czech Republic;

PERDOCH Jozef, Ph. D., Armed Forces Academy of General Milan Rastislav Štefánik, Slovak Republic.

ISSN 2076-1546

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення про державну реєстрацію № 1181 від 11.04.2024 (ідентифікатор медіа – R30-03932).

ЗМІСТ

| | |
|--|-----|
| Гуменюк М. О., Оверчук С. П., Ткач А. О. Аналіз шляхів підвищення точності оброблення навігаційної інформації в бортових підсистемах безпілотних літальних апаратів І класу в умовах радіоелектронного подавлення | 5 |
| Рудницький В. М., Ларін В. В., Тристан С. А., Піонтківський П. М. Побудова та дослідження операцій розширеного матричного криптоперетворення на основі дискретно-казуальної логіки | 21 |
| Ахтирцева В. С., Франжі О. В., Фриз В. П. Модернізація FM-передавача RIAB за рахунок розробки спрямованої передавальної антени | 37 |
| Нагорнюк О. А. Методики розрахунку зон радіоподавлення передавачів перешкод приймачам сигналів супутникових радіонавігаційних систем | 48 |
| Котенко В. М., Прокопович В. Д., Самонюк О. В., Синицький Ю. В. Дослідження автокореляційних функцій багаточастотних амплітудно-модульованих радіосигналів | 65 |
| Зімчук І. В., Шапар Т. М. Синтез нерекурсивних цифрових фільтрів для інерціальних систем навігації безпілотних літальних апаратів | 80 |
| Бугайов М. В. Вплив спотворень діаграми спрямованості антени на помилки сумарно-різницевого методу пеленгування | 93 |
| Поплавець С. І., Чернявський О. Ю., Сампір І. А. Науково-методичний підхід до організації та проведення практичних занять з військової топографії із застосуванням методів мережевого планування | 105 |
| Сидорчук О. Л., Залевський В. Й., Ципоренко В. Г. Урахування коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль від позамежних перерізів рупорних опромінювачів фазованих антенних решіток | 120 |
| Каптур В. А., Подкалюк Є. П. Формування та обґрунтування структури типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасної війни | 139 |
| Єгоров В. О., Запорожченко Ю. І., Тарасенко В. О. Математична модель підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіорозвідки | 150 |
| Омельчук І. А., Пількевич І. А., Подчашинський Ю. О., Згуря В. І. Метод перевіряння еталонів для збереження достовірності результатів випробування безпілотних систем | 169 |
| Опенько П. В., Доска О. М., Сампір О. М. Визначення раціонального плану доставляння військових вантажів на лінії бойового зіткнення з використанням безпілотних літальних апаратів | 184 |

| | |
|--|-----|
| Іщенко Д. А., Стрінада В. В. Підхід до оцінювання ефективності радіоелектронного прикриття об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних безпілотних систем | 197 |
| Бондаренко Ю. Л., Іщенко І. А. Аналіз режимів роботи електродвигуна розвідувального безпілотного літального апарата І класу під час виконання бойових завдань | 211 |
| Романько В. А., Коваль Д. В., Левченко О. В. Застосування резидуального нейронного фільтра Калмана в навігаційному модулі безпілотного літального апарата | 224 |
| Автори випуску | 243 |
| Вимоги до оформлення матеріалів | 250 |

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.01

УДК 623.7

М. О. Гуменюк, канд. техн. наук, доц.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0001-6022-3052>

С. П. Оверчук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0009-0161-8076>

А. О. Ткач

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-7983-2285>

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В БОРТОВИХ ПІДСИСТЕМАХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ І КЛАСУ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕННЯ

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення точності навігаційної інформації в безпілотних літальних апаратах I класу, що працюють в умовах радіоелектронного подавлення. Показано, що точність навігації є критичною для виконання розвідувальних і тактичних завдань, а вплив засобів радіоелектронного подавлення призводить до деградації сигналів GNSS і швидкого накопичення похибок у наявних мікроелектромеханічних датчиках інерціально-навігаційної системи. Охарактеризовано основні джерела похибок у навігаційних підсистемах, зокрема стохастичні шуми, систематичні дрейфи й нестационарні збурення, які значно посилюються в разі втрати супутникової корекції.

Проаналізовано ключові групи методів навігаційної фільтрації: фільтр Калмана та його модифікації, робастні підходи для зменшення впливу аномальних вимірювань, адаптивні методи для підлаштування до змін характеристик шумів та багатомодельні алгоритми IMM, що дозволяють адаптивно перемикатися між режимами роботи. Розглянуто також механізми виявлення недостовірних GNSS-вимірювань на основі χ^2 -критерію та підходи до прогнозування впливу атмосферних збурень за допомогою ARIMA-моделей.

Окрему увагу приділено нелінійним часовим моделям NAR і NARX, які демонструють значно вищу здатність відтворювати складну динаміку похибок інерціально-навігаційної системи та нестационарні зовнішні впливи порівняно з лінійними методами. Підкреслено, що ці моделі мають потенціал для суттєвого підвищення точності навігаційних розв'язків у режимах деградації чи повної відсутності GNSS. Водночас їх ефективне впровадження потребує подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію архітектури нейронних мереж, зменшення обчислювальних витрат і забезпечення стабільності прогнозування в реальному часі. Саме розвиток NAR/NARX-моделей

© М. О. Гуменюк, С. П. Оверчук, А. О. Ткач, 2026

є перспективним напрямом, який може стати ключовим компонентом майбутніх навігаційних систем безпілотних літальних апаратів I класу.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; інерціальна навігація; точність; радіоелектронне подавлення; фільтр Калмана; робастні методи; адаптивна фільтрація; IMM; ARIMA; NAR / NARX.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні воєнні конфлікти підтвердили ключову роль безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як інструментів тактичної та оперативної розвідки, спостереження й наведення озброєння. Успішність застосування розвідувальних БПЛА I класу значною мірою визначається стійкістю їхніх навігаційних систем. Навігаційний комплекс виконує завдання визначення координат, швидкості, курсу та висоти польоту апарата в реальному масштабі часу. Похибки навігації безпосередньо впливають на здатність БПЛА виконати бойове завдання в умовах радіоелектронного подавлення (РЕП), можливість точного цілевказання та збереження самого апарата.

Сучасна практика бойових дій показує, що РЕП стало одним із ключових методів протидії застосуванню БПЛА. Противник вибудовує багаторівневу систему радіоелектронної боротьби (РЕБ), яка охоплює передній край та тактичну глибину, створюючи умови, за яких вони втрачають здатність до точного позиціонування. Сьогодні стандартним рішенням для БПЛА I класу є використання інтегрованих навігаційних систем, які поєднують інерціальну й супутникову навігацію. Особливістю БПЛА I класу (злітна маса ≤ 15 кг) є жорсткі обмеження за масогабаритними характеристиками та енергоспоживанням, що не дозволяє використовувати дорогі й важкі високоточні інерціальні навігаційні системи (ІНС) (FOG, RLG), тому основою їх навігаційних комплексів є безплатформні ІНС на базі MEMS-сенсорів (акселерометрів, гіроскопів, магнітометрів, датчиків тиску), які компактні та енергоефективні, але не вирізняються високою точністю. ІНС працюють автономно, проте їхні похибки зростають із часом, тоді як супутникові навігаційні системи (СНС) забезпечують високу точність, але вразливі до дії засобів РЕП.

Отже, визначення раціонального складу елементної бази й обчислювальних алгоритмів для підвищення точності автономної навігації БПЛА є важливим науково-практичним завданням, що не має однозначного розв'язання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення точності навігаційної інформації в бортових підсистемах БПЛА I класу в умовах РЕП є предметом активних наукових досліджень. Вона охоплює широкий спектр підходів: від класичних методів оцінювання стану до сучасних нелінійних моделей прогнозування.

Методи фільтрації Калмана та їхні модифікації (EKF, UKF) вже давно визнано як один із найефективніших інструментів для інтеграції даних GPS та інерціальної вимірювальної системи (IMU) в навігаційні системи, які ґрунтовно описані в роботах [1–4]. Ці дослідження заклали фундамент інтеграції даних інерціальних вимірювальних блоків і GNSS-приймачів, проте підкреслили обмеженість класичного підходу в умовах негаусових завад, наявності викидів та швидкої зміни статистики шумів.

Для подолання цих недоліків активно розвивається напрям робастної фільтрації. Теоретичні основи M -оцінювачів були сформульовані в роботах Хубера [5] та Хампела

[6], а сучасні дослідження [7] показали ефективність їхнього застосування в задачах навігаційної обробки. Зокрема, робастизація інновацій у фільтрі Калмана за допомогою функцій Хубера або Хампела забезпечує суттєве підвищення стійкості до імпульсних завад і спотворених вимірювань, характерних для РЕП. Водночас наголошується на необхідності оптимального вибору параметрів робастних функцій, оскільки надмірне «обрізання» похибок може призвести до втрати точності в нормальних умовах.

Іншим напрямом, що отримав значний розвиток, є адаптивна фільтрація. Методи інноваційно-коваріаційної оцінки (IAE) та алгоритми Sage – Husa дозволяють у реальному часі коригувати матриці коваріацій шумів [8, 9], що підвищує стійкість навігаційної системи в умовах змінної інтенсивності завад. Сучасні роботи демонструють ефективність таких підходів у випадках поступової деградації сигналів GNSS. Разом із тим вказано на певні обмеження: адаптивні алгоритми характеризуються інерційністю, що знижує їхню ефективність у разі різких змін умов середовища.

Значна кількість досліджень зосереджена на застосуванні багатомодельних алгоритмів (IMM), які забезпечують можливість одночасного розгляду кількох сценаріїв роботи навігаційної системи [10]. Наприклад, у роботі [11] доведено, що застосування IMM дозволяє плавно переходити між такими режимами: «GNSS у нормі», «GNSS деградував» та «GNSS відсутній». Це істотно підвищує стійкість навігаційної системи в умовах РЕП, хоча супроводжується збільшенням обчислювальної складності та необхідністю правильного налаштування матриці ймовірностей переходів.

Важливу роль у забезпеченні достовірності даних відіграють методи моніторингу та антиспуфінгу. Класичним підходом є використання критерію узгодженості Пірсона (χ^2 -критерій) для інновацій, які передбачають аналіз залишків та виявлення несправних супутників [12]. Додатково в [13] вказано на ефективність поєднання цих підходів із крос-перевіркою даних інерціальної системи та датчиків повітряної швидкості. Водночас проблема налаштування порогів для χ^2 -тестів і зниження частоти хибних спрацьовувань у складних умовах залишається відкритою.

Окрему групу досліджень становлять роботи з моделювання атмосферних збурень із використанням традиційних ARIMA-моделей [14], які можуть бути базовим інструментом для короткострокового прогнозу вітру. Водночас їхня лінійність не дозволяє повною мірою описати турбулентні процеси.

Окремий напрям становлять дослідження, у яких класичний фільтр Калмана поєднують із нейронними мережами. У працях [15–17] запропоновано різні варіанти Deep Kalman Filters, нейромережеву апроксимацію нелінійної динаміки, а також гібридні схеми, де нейромережеві модулі коригують параметри фільтра Калмана.

У роботах [18–20] описані можливості застосування нелінійних часових моделей NAR / NARX для моделювання та прогнозування нелінійних процесів у реальному часі, а також розроблені ефективні підходи до використання нелінійних авторегресій у технічних застосуваннях.

Отже, аналіз наукових публікацій свідчить, що жоден із методів не може забезпечити універсального розв'язання проблеми підвищення точності навігаційної інформації БпЛА I класу в умовах РЕП.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є аналіз сучасних підходів до підвищення точності оброблення навігаційної інформації в бортових підсистемах БпЛА, результати якого слугуватимуть науково-методичною основою для подальшого вдосконалення алгоритмів оброблення навігаційної інформації в бортових підсистемах БпЛА I класу літакового типу для підвищення точності їх позиціонування в умовах РЕП та подальшої модернізації безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) як зразків озброєння для потреб оборони.

Виклад основного матеріалу. Якість навігаційної інформації в БпЛА безпосередньо визначається характеристиками сенсорів, що входять до складу бортового навігаційного комплексу, та умовами їхньої експлуатації. Для БпЛА I класу типовим є поєднання ІМУ, приймача GNSS, барометричного альтиметра, датчика повітряної швидкості та магнітометра. Кожен із цих елементів має власні особливості похибок, які по-різному проявляються у звичайних умовах та в разі активного РЕП.

ІМУ на основі MEMS-технологій вирізняються малими масогабаритними характеристиками та низьким енергоспоживанням, що робить їх основним вибором для БпЛА I класу. Проте такі сенсори характеризуються підвищеними шумами та дрейфами: випадкові збурення в показах гіроскопів накопичуються у вигляді похибки курсу, а неточності акселерометрів призводять до зростання помилки у швидкості та положенні. У стабільних умовах ці похибки можуть компенсуватися завдяки GNSS, проте в разі його втрати інерціальна система починає швидко деградувати.

Отже, джерела похибок у навігаційних системах БпЛА можна поділити на три групи:

- 1) стохастичні шуми – випадкові коливання вимірювань (характерні для ІМУ);
- 2) систематичні похибки – дрейфи та зміщення (ІМУ, барометр, магнітометр);
- 3) нестационарні збурення – викиди та підробки сигналів під впливом РЕП (GNSS, магнітометр, приймач повітряного тиску).

Модель похибок ІНС БпЛА може бути лінеаризована та подана у вигляді лінійної динамічної системи, що дозволяє застосовувати розширений фільтр Калмана ЕКФ (Extended Kalman Filter) для корекції її похибок, який здатний оптимально поєднувати результати прогнозу, отримані за математичною моделлю руху, із наявними вимірюваннями сенсорів, мінімізуючи середньоквадратичну похибку оцінювання стану.

З урахуванням вимог до точності та обчислювальної складності використовується 15-вимірний вектор стану похибок, який включає помилки орієнтації, швидкості, положення, а також систематичні зміщення інерціальних датчиків:

$$X_k = [\psi_E, \psi_N, \psi_U, \delta V_E, \delta V_N, \delta V_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \nabla b_x, \nabla b_y, \nabla b_z, \varepsilon b_x, \varepsilon b_y, \varepsilon b_z]^T,$$

де ψ_E, ψ_N, ψ_U – помилки орієнтації;

$\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U$ – похибки складових швидкості;

$\delta L, \delta \lambda, \delta h$ – похибки координат (широта, довгота, висота);

$\nabla b_x, \nabla b_y, \nabla b_z$ – зміщення акселерометрів;

$\varepsilon b_x, \varepsilon b_y, \varepsilon b_z$ – зміщення гіроскопів.

У дискретному часі лінеаризована модель похибок записується в стандартному вигляді:

$$\begin{cases} X_{k+1} = F_k X_k + G_k w_k, \\ z_k = H_k X_k + v_k \end{cases},$$

де F_k – матриця переходу стану (залежить від поточного режиму руху, орієнтації, швидкості);

G_k – матриця розподілу системного шуму;

H_k – матриця спостережень;

w_k – процесні шуми (невраховані збурення, шум ІМУ);

v_k – шум вимірювань (GNSS / баро / магнітометр тощо).

В ІНС БпЛА формування оцінок швидкості V_{INS} та положення P_{INS} здійснюється шляхом чисельного інтегрування вимірювань питомих сил і кутових швидкостей, отриманих з інерціального вимірювального модуля, з урахуванням орієнтації апарата в навігаційній системі координат. Фільтр Калмана використовується для оцінювання похибок швидкості δV та положення $\delta P = [\delta L, \delta \lambda, \delta h]^T$, які визначаються на основі різниці між вимірюваннями GNSS та значеннями, обчисленими ІНС:

$$\delta P(t) = P_{GNSS}(t) - P_{INS}(t),$$

$$\delta V(t) = V_{GNSS}(t) - V_{INS}(t).$$

Тоді вектор спостережень можна подати в такому вигляді:

$$z_k = \begin{bmatrix} \delta P \\ \delta V \end{bmatrix}.$$

Після оцінювання стану $\hat{X}_{k|k}$ корекція навігаційного розв'язку виконується за принципом «INS мінус оцінена похибка»:

$$\begin{cases} V_{corr} = V_{INS} - \delta \hat{V} \\ P_{corr} = P_{INS} - \delta \hat{P} \\ \psi_{corr} = \psi_{INS} - \delta \hat{\psi} \end{cases}.$$

У науковій літературі [1, 2] зазначається, що фільтр Калмана є оптимальним у разі виконання двох припущень: усі шуми моделі й вимірювань мають гаусівський розподіл, коваріаційні матриці Q та R відомі та правильно задані. На практиці ці умови рідко виконуються повністю, особливо за РЕП, де шуми є негаусовими, а характеристики сигналів змінюються в часі. Саме тому класичний фільтр Калмана часто слугує лише відправною точкою для розроблення модифікацій розширених (EKF), безтрасових (UKF), робастних та адаптивних варіантів.

Одним із найбільш суттєвих недоліків класичного фільтра Калмана є його чутливість до аномальних вимірювань, що виникають унаслідок сильних завад чи навмисного спотворення сигналів GNSS. У таких випадках алгоритм, який вважає вимірювання «правдивими», може суттєво змістити оцінку стану, що призводить до втрати точності

й навіть до зриву роботи навігаційної підсистеми. Для усунення цього недоліку розроблено робастні методи, які обмежують вплив нетипових даних і забезпечують стійкість оцінювання. Їхня ключова ідея полягає в тому, щоб застосовувати спеціальні функції втрат, які реагують на похибки вимірювань по-різному, залежно від їхнього розміру. Для малих відхилень функція поводить ся як класична квадратична похибка (забезпечуючи високу точність), але для великих відхилень зростання обмежується, завдяки чому зменшується вплив аномалій на результат оцінювання.

Функція Хубера є однією з найпоширеніших у цій сфері [4], вона має такий вигляд:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{1}{2}r^2, & |r| \leq \delta; \\ \delta\left(|r| - \frac{1}{2}\delta\right), & |r| \geq \delta, \end{cases}$$

де r – залишок (інновація) між вимірюванням і прогнозом;

δ – порогове значення, яке визначає межу між нормальними та аномальними відхиленнями.

Застосування функції Хубера у фільтрі Калмана означає, що невеликі інновації обробляються так, як у класичному алгоритмі, а великі отримують знижену вагу. Відповідно, короткочасні імпульсні завади не призводять до катастрофічних стрибків у навігаційному розв'язку.

У публікації [21] описано також інші робастні функції, зокрема функцію Тюкі, яка повністю «обрізає» надмірно великі відхилення, фактично ігноруючи їх у процесі оцінювання. Цей підхід ще більше підвищує стійкість до викидів, але водночас може спричинити втрату корисної інформації, якщо аномальне значення не є помилковим, а відображає реальну зміну динаміки.

Отже, робастні методи є важливим доповненням до класичного фільтра Калмана. Вони не усувають усіх проблем навігації в умовах РЕП, але суттєво підвищують стійкість і надійність оцінювання, роблячи систему менш вразливою до аномальних сигналів.

Класичний фільтр Калмана передбачає, що статистичні характеристики шумів процесу та вимірювань (коваріаційні матриці Q та R) є відомими й не змінними в часі. Проте в реальних умовах польоту, особливо в разі дії засобів РЕП, ці припущення часто не виконуються. Інтенсивність завад, рівень шумів сенсорів і навіть властивості динамічної моделі можуть змінюватися залежно від висоти, швидкості, температури або електромагнітної обстановки. У таких умовах використання фіксованих параметрів Q та R призводить до зниження точності та стійкості алгоритму.

Саме тому в останні десятиліття значного розвитку набули адаптивні методи фільтрації, які дозволяють динамічно підлаштовувати параметри фільтра Калмана залежно від поточного стану системи та середовища. Найбільш поширеним є оновлення матриці коваріацій шумів вимірювань R , яке базується на аналізі послідовності інновацій [6, 7].

Розглянемо приклад формули для адаптації матриці шуму вимірювань R_k :

$$R_k = \alpha R_{k-1} + (1 - \alpha)(z_k - \hat{z}_k)(z_k - \hat{z}_k)^T,$$

де R_k – поточна оцінка коваріаційної матриці шуму вимірювань;

R_{k-1} – попередня оцінка;

z_k – вектор поточних вимірювань;

\hat{z}_k – прогнозне значення вимірювань (отримане з моделі стану);

$\alpha \in [0, 1]$ – коефіцієнт згладжування.

Ця формула – експоненційно-зважене оновлення коваріації вимірювального шуму, яке дозволяє фільтру Калмана пристосовуватися до зміни рівня завад у реальному часі.

Якщо вимірювання стабільні, то R_k залишається майже сталим.

Коли з'являються сильні відхилення або імпульсні шуми, тоді $(z_k - \hat{z}_k)(z_k - \hat{z}_k)^T$ зростає і фільтр зменшує довіру до вимірювань.

У [6, 7] описано кілька підходів до адаптації:

алгоритм Sage – Husa – спільна адаптація Q та R із урахуванням змін у динаміці системи;

гібридні методи – поєднання адаптації з робастними функціями, що дозволяє враховувати як плавні зміни шумів, так і поодинокі викиди.

Останні дослідження свідчать, що найефективніше адаптивні алгоритми проявляють себе у випадках поступової деградації сигналів GNSS, коли рівень шуму зростає повільно. У таких умовах адаптація дозволяє зменшити вагу ненадійних вимірювань і запобігти різкому погіршенню точності. Натомість у разі короткочасних імпульсних завад більш ефективними є робастні методи. Саме тому в сучасних навігаційних архітектурах для БПЛА адаптивна фільтрація застосовується в поєднанні з іншими підходами.

Отже, адаптивні методи є важливим доповненням до класичного фільтра Калмана. Вони забезпечують здатність системи адаптовуватися до мінливих умов та підтримувати прийнятну якість навігаційної інформації навіть за активного РЕП.

У складних динамічних системах використання єдиної моделі руху у фільтрі Калмана не завжди забезпечує належну точність і стійкість оцінювання стану. Для розв'язання цієї проблеми застосовуються багатомодельні алгоритми, які дозволяють одночасно враховувати кілька моделей динаміки та здійснювати адаптивний вибір найвідповіднішої. Найбільш ефективним серед них є алгоритм взаємодіючих моделей (Interacting Multiple Model – IMM).

Основна ідея алгоритму полягає в тому, що система може перебувати в одному з кількох можливих режимів руху, кожен із яких описується власною математичною моделлю (з різними матрицями Q , R). На усіх кроках часу для кожної моделі працює окремих фільтр Калмана або його розширена версія (ЕКФ, UKF, робастний фільтр тощо).

Щоразу перед оновленням відбувається змішування станів між моделями, після чого обчислюються ймовірності кожної моделі на основі інновацій та їхньої статистики. Отримані результати усіх фільтрів комбінуються за зваженим правилом:

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^M \mu_i(k) \hat{x}_i(k),$$

де $\mu_i(k)$ – поточна ймовірність i -ї моделі;

$\hat{x}_i(k)$ – оцінка стану i -ї моделі.

У наукових публікаціях [22, 23] зауважено, що IMM є ефективним компромісом між точністю та обчислювальною складністю. На відміну від спроб використання єдиної універсальної моделі, цей підхід дозволяє більш адекватно відображати різні режими роботи сенсорів і зовнішнього середовища.

Отже, IMM можна розглядати як один із ключових інструментів підвищення точності та стійкості навігаційної інформації в умовах РЕП.

Забезпечення достовірності навігаційної інформації є не менш важливим завданням, ніж підвищення її точності. Умови РЕП супроводжуються не лише зростанням шумів, але й можливістю навмисного спотворення сигналів GNSS (спуфінгу). Такі атаки особливо небезпечні, оскільки здатні вводити систематичні помилки без очевидних ознак деградації. Відповідно, сучасні навігаційні системи повинні мати механізми моніторингу аномалій та антиспуфінгу, які дозволяють виявляти й відсівати недостовірні вимірювання.

Найбільш поширеним інструментом перевірки достовірності є аналіз інновацій фільтра Калмана з використанням критерію узгодженості Пірсона (χ^2 -критерій). Якщо система працює коректно, статистика інновацій відповідає заданим коваріаціям. Відхилення від цього є сигналом про появу аномальних вимірювань. Класична формула для статистики інновацій (T), використана у фільтрі Калмана, має такий вигляд:

$$T = (z_k - H\hat{x}_{k|k-1})^T S_k^{-1} (z_k - H\hat{x}_{k|k-1}),$$

де z_k – вектор вимірювань на кроці k ;

$\hat{x}_{k|k-1}$ – прогноз стану системи, отриманий із моделі (апріорна оцінка);

H – матриця спостереження, яка пов'язує стан системи з вимірюваними параметрами;

S_k – коваріаційна матриця інновацій, що описує статистику різниці між прогнозом і реальними вимірюваннями.

Значення T показує, наскільки отримане вимірювання узгоджується з прогнозом фільтра. Якщо воно перевищує певний поріг, то вимірювання вважається сумнівним. Такий підхід широко використовують у практичних реалізаціях, зокрема в системах PX4 Autopilot, що забезпечує своєчасне відсікання грубих похибок [2, 9].

Моніторинг аномалій та антиспуфінг слід розглядати як невід'ємний рівень інтегрованої архітектури навігаційного оброблення. Якщо робастні й адаптивні алгоритми знижують вплив завад, а IMM забезпечує гнучкість у режимах роботи, то саме механізми моніторингу гарантують достовірність даних, запобігаючи критичним відмовам.

Одним із найбільш суттєвих зовнішніх факторів, які впливають на точність навігації БПЛА, є атмосферні збурення, передусім вітер. Його дія проявляється у вигляді зсувів траєкторії, похибок у визначенні швидкості та курсу, а також у зростанні похибок інерціальної системи, коли GNSS недоступний. Для компенсації цих ефектів у навігаційні алгоритми інтегрують моделі прогнозування вітрових впливів, які дозволяють покращити оцінювання стану та стабілізувати траєкторію польоту.

Найбільш поширеним інструментом у цій сфері є ARIMA-моделі (Autoregressive Integrated Moving Average), які застосовують для короткострокового прогнозування

часових рядів [14]. Їхня популярність пояснюється відносною простотою, надійністю та достатньою точністю для опису лінійних процесів.

Загальна формула ARIMA має такий вигляд:

$$w_t = w_{t-1} + \phi_1(w_{t-1} - w_{t-2}) + \varepsilon_t + \theta_1\varepsilon_{t-1},$$

де w_t – прогнозоване значення (наприклад, швидкість вітру);

ϕ_1 – коефіцієнт авторегресії;

ε_t – поточний шум (випадковий вплив);

θ_t – коефіцієнт ковзного середнього.

Якщо $\theta_1 > 0$, то попередні похибки (шум) частково додаються до поточного прогнозу.

Якщо $\theta_1 < 0$ – фільтр гасить вплив попередніх шумів.

У контексті навігаційних систем БПЛА ARIMA використовують для прогнозу короткострокових змін вітрового потоку на основі попередніх вимірювань. Це дозволяє компенсувати вплив вітру на траєкторію навіть у разі відсутності GNSS-корекції.

Попри значну поширеність ARIMA-моделей у задачах прогнозування, їхня лінійна природа не дозволяє повною мірою описувати складні атмосферні процеси, зокрема турбулентність та раптові пориви вітру. Одним із напрямів подолання цих обмежень є поєднання нейронних мереж із класичними алгоритмами оцінювання стану, зокрема фільтром Калмана, що дозволяє підвищити точність навігації в умовах нелінійності та невизначеності середовища [15–17].

Водночас для опису нелінійних динамічних процесів широко застосовуються спеціалізовані часові нейронні моделі, серед яких особливе місце займають NAR (Nonlinear Autoregressive) та NARX (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs) [18–20].

NARX – це рекурентна динамічна нейронна мережа. Вона має зворотні зв'язки, які охоплюють кілька її шарів. Як видно на рис. 1, є дві різні архітектури моделі нейронної мережі NARX: серійно-паралельна (із розімкненим контуром) і паралельна (із замкненим контуром), які задаються рівняннями (1) і (2) відповідно:

$$\hat{y}(t+1) = F\left(y(t), y(t-1), \dots, y(t-n_y), x(t), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_x)\right), \quad (1)$$

$$\hat{y}(t+1) = F\left(\hat{y}(t), \hat{y}(t-1), \dots, \hat{y}(t-n_y), x(t), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_x)\right), \quad (2)$$

де $F(\cdot)$ – нелінійна функція, що реалізується нейронною мережею;

$x(t)$ – екзогенні вхідні сигнали (наприклад, навігаційні параметри, отримані з INS);

$y(t)$, $y(t-1)$ – істинні минулі значення часового ряду (наприклад, істинні значення похибок положення δP та швидкості δV , отримані на основі GNSS-вимірювань);

$\hat{y}(t+1)$ – прогнозована змінна (прогнозоване значення похибок швидкості та положення, сформоване нейромережею з використанням затриманих значень навігаційних параметрів, що застосовують для подальшої компенсації ІНС);

n_x, n_y – кількість затримок за входами та виходами відповідно.

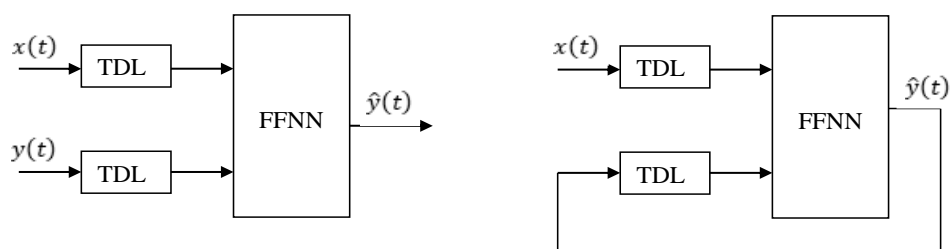


Рис. 1. Архітектури NARX із розімкнутим та замкнутим контурами

У серійно-паралельній архітектурі майбутнє значення часового ряду $y(t-1)$ прогнозується на основі теперішніх і минулих значень $x(t)$ та істинних минулих значень часового ряду $y(t)$. У паралельній архітектурі прогнозування виконується на основі теперішніх і минулих значень $x(t)$ та минулих прогнозованих значень часового ряду $\hat{y}(t)$.

Використання послідовно-паралельної архітектури має дві переваги. Перша полягає в тому, що використання істинних значень як вхідних даних для мережі прямого поширення є точнішим. Друга перевага передбачає, що архітектура отриманої мережі є лише мережею прямого поширення (FFNN), тому можна використовувати звичайні алгоритми навчання для багат шарового перцептрона (MLP). Після фази навчання нейронна мережа NARX перетворюється на паралельну архітектуру, яка є ефективною для прогнозування на багато кроків уперед [24, 25].

Нейронна мережа NARX не замінює розширеного фільтра Калмана і не виконує прямого оцінювання координат, а може бути використана для прогнозування окремих компонент 15-вимірного вектора стану EKF, які безпосередньо впливають на навігаційний розв'язок та є спостережуваними через інновації INS / GNSS, а саме похибок швидкості δV та положення δP , які складно адекватно описати лінійними стохастичними моделями. Результатом роботи нейронної мережі є оцінки цих похибок $\delta \hat{V}^{NN}$, $\delta \hat{P}^{NN}$, що використовуються для корекції інерціального навігаційного розв'язку.

Помилки орієнтації, зсуви акселерометрів і дрейфи гіроскопів оцінюють виключно фільтром Калмана з використанням фізичної моделі інерціальної навігації.

У разі моделі NAR структура подібна, але без екзогенних вхідних сигналів, тобто прогноз базується лише на минулих значеннях самої змінної $y(t)$.

Переваги й недоліки розглянутих підходів підвищення точності оброблення навігаційної інформації в бортових підсистемах БПЛА наведено в табл. 1.

Враховуючи результати проведеного аналізу, можна стверджувати, що доцільним є використання нелінійних авторегресійних моделей із зовнішніми входами типу NARX як одного з ключових компонентів перспективних навігаційних алгоритмів для БПЛА I класу.

На відміну від класичних методів фільтрації, що базуються на припущенні гаусівських шумів і лінійності моделей, моделі типу NARX дозволяють описувати складні нелінійні та нестационарні процеси, характерні для похибок ІНС в умовах РЕП, коли статистичні характеристики завад швидко змінюються, а класичні фільтри Калмана втрачають оптимальність.

Порівняльна таблиця підходів до підвищення точності оброблення навігаційної інформації в бортових підсистемах БпЛА

| Підхід | Ключова ідея | Переваги | Недоліки |
|--|--|--|--|
| Фільтр Калмана (KF / EKF / UKF) | Поєднання прогнозу за моделлю та вимірювань для мінімізації похибки оцінювання стану | Оптимальність за гаусових шумів; обчислювальна ефективність; перевірений практикою | Чутливість до викидів; залежність від точності моделей; складність налаштування матриць Q, R |
| Робастні методи (Хубер, Тюкі) | Обмеження впливу аномальних вимірювань за рахунок спеціальних функцій втрат | Стійкість до викидів і негаусових шумів; простота інтеграції в EKF / UKF | Зниження точності в ідеальних умовах; необхідність вибору порогових параметрів |
| Адаптивна фільтрація | Динамічна зміна коваріацій шумів на основі статистики інновацій | Автоматичне підлаштування до умов; підвищена стійкість до змін середовища | Інерційність адаптації; ризик нестійкості при неправильному налаштуванні |
| IMM (Interacting Multiple Model) | Використання кількох моделей руху з подальшим зваженим комбінуванням результатів | Ефективність у разі змінних режимів (маневри, втрата GNSS); підвищення точності | Висока обчислювальна складність; потреба в налаштуванні матриці переходів |
| Моніторинг та антиспуфінг (χ^2 -критерій) | Контроль узгодженості вимірювань і виявлення підроблених сигналів | Виявлення аномалій GNSS; підвищення достовірності даних | Імовірність хибних спрацьовувань; залежність від кількості супутників; налаштування порогів |
| ARIMA-моделі | Лінійне прогнозування часових рядів на основі попередніх значень | Простота реалізації; ефективність для короткострокових прогнозів | Лінійність; нездатність відтворювати складні нелінійні процеси; залежність від параметрів |
| Нейромережева корекція фільтра Калмана | Використання нейронної мережі для корекції моделі або параметрів фільтра Калмана | Підвищення точності в нелінійних умовах; компенсація неврахованих збурень | Потреба у великих даних для навчання; збільшення обчислювальних витрат; ризик перенавчання |
| Моделі типу NAR та NARX (рекурентні динамічні нейронні мережі) | Нелінійне моделювання часових процесів з урахуванням внутрішньої динаміки та зовнішніх впливів | Висока точність прогнозування; здатність відтворювати складні нелінійні процеси | Потреба в навчальних даних; обчислювальна складність; ризик перенавчання |

Порівняно з ARIMA-моделями, обмеженими лінійною природою, моделі типу NARX забезпечують вищу точність прогнозування завдяки врахуванню нелінійних залежностей і можливості інтеграції екзогенних змінних, зокрема навігаційних параметрів, сформованих інерціальною системою. Це дозволяє ефективно відтворювати динаміку похибок швидкості та положення, що накопичуються в ІНС у разі втрати сигналів GNSS.

Крім того, на відміну від підходів, у яких нейронна мережа формує узагальнений корекційний доданок до оцінки стану, застосування моделей типу NARX доцільно трактувати як допоміжний інструмент у складі гібридної навігаційної системи, спрямований на прогнозування окремих компонент похибок ІНС із подальшим використанням цих оцінок для корекції навігаційного розв'язку. Такий підхід дозволяє зберегти переваги класичних алгоритмів оцінювання стану та водночас підвищити точність навігаційного розв'язку в складних умовах.

Додатковою перевагою моделей типу NARX є відносно нижча параметрична складність порівняно з глибокими нейронними мережами, що робить їх придатними для реалізації в бортових обчислювальних системах БпЛА з обмеженими ресурсами.

Отже, використання моделей типу NARX є обґрунтованим компромісом між точністю, адаптивністю та обчислювальною складністю і може розглядатися як перспективний напрям подальших досліджень у задачах підвищення точності навігаційної інформації в умовах РЕП.

Висновки. У статті проведено порівняльний аналіз сучасних підходів, спрямованих на підвищення точності оброблення навігаційної інформації в БпЛА I класу в умовах активного РЕП. Розглянуто класичні й новітні алгоритми оцінювання стану, адаптації та прогнозування з урахуванням їхньої ефективності й обмежень у практичних застосуваннях.

Використання NARX-моделей у навігаційних підсистемах БпЛА I класу відкриває можливості для точнішого відтворення нелінійної динаміки похибок ІНС, зокрема похибок швидкості та положення, які інтенсивно накопичуються в умовах втрати сигналів GNSS. Такі моделі перевершують ARIMA-підхід у задачах відтворення нелінійних і нестационарних процесів, проте потребують обґрунтованого вибору структури та контролю обчислювальної складності.

Результати проведеного аналізу стануть корисними в разі модернізації БпЛАК (БпЛА) як зразків озброєння для потреб оборони шляхом удосконалення алгоритмів оброблення навігаційної інформації в бортових підсистемах БпЛА I класу літакового типу з використанням NARX-моделей для підвищення точності їх позиціонування в умовах РЕП.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Sjöberg P. Design and Implementation of an Exogenous Kalman Filter for UAVs. KTH Royal Institute of Technology, 2018. 80 p. URL: <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1232900/FULLTEXT01.pdf> (last accessed: 04.01.2026).
2. Factor Graph Optimization for GNSS / INS Integration: A Comparison with the Extended Kalman Filter / W. Wen, T. Pfeifer, X. Bai, L.-T. Hsu // Navigation: Journal of the Institute of Navigation. 2021. Vol. 68, Iss. 2. P. 315–331. <https://doi.org/10.1002/navi.421>
3. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. P. 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
4. Bhatt D., Aggarwal P., Devabhaktuni V., Bhattacharya P. A Novel Hybrid Fusion Algorithm to Bridge the Period of GPS Outages Using Low Cost INS // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41, Iss. 5. P. 2166–2173. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.09.015>
5. Peter J. Huber. Robust Statistics. New York : Wiley, 1981. 317 p. <https://doi.org/10.1002/0471725250>

6. Hampel F. R., Ronchetti E. M., Rousseeuw P. J., Stahel W. A. Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions. New York : Wiley, 1986. 502 p.
7. Zhang Y., Yu F., Gao W., Wang Y. An Improved Strapdown Inertial Navigation System Initial Alignment Algorithm for Unmanned Vehicles // Sensors. 2018. Vol. 18 (10). <https://doi.org/10.3390/s18103297>
8. Akhlaghi S., Zhou N., Huang Z. Adaptive Adjustment of Noise Covariance in Kalman Filter for Dynamic State Estimation // IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2017. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8273755>
9. Wang X., Wang A., Xiong Y., Liang B. A Modified Sage-Husa Adaptive Kalman Filter for State Estimation of Electric Vehicle Servo Control System // Energy Reports. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.105>
10. Genovese A. The Interacting Multiple Model Algorithm for Accurate State Estimation of Maneuvering Targets. 2021. URL: <https://secwww.jhuapl.edu/techdigest/content/techdigest/pdf/V22-N04/22-04-Genovese.pdf> (last accessed: 18.01.2026).
11. Zhang T., Zong Q., Liu X. Adaptive IMM Algorithm for Multi-Mode Integrated Navigation System under GNSS Degradation // Aerospace Science and Technology. 2019. Vol. 92. P. 593–602. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.06.027>
12. Моцний Ф. В. Аналіз непараметричних і параметричних критеріїв перевірки статистичних гіпотез. Ч. I. Критерії узгодження Пірсона і Колмогорова // Статистика України. 2018. № 4 (83). [https://doi.org/10.31767/su.4\(83\)2018.04.02](https://doi.org/10.31767/su.4(83)2018.04.02)
13. Sun K., Gebre-Egziabher D. Air Data Fault Detection and Isolation for Small Unmanned Aircraft Using an Integrity Monitoring Framework // Navigation: Journal of the Institute of Navigation. 2021. Vol. 68, No. 2. P. 431–447. <https://doi.org/10.1002/navi.414>
14. Alsamamra H., Salah S. Performance Analysis of ARIMA Model for Wind Speed Forecasting // Simulation Modelling Practice and Theory. 2024. <https://doi.org/10.1177/01445987241248201>
15. Романько В. А., Срібний О. М. Інтеграція нейронного фільтра Калмана в систему наведення високодинамічних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 29 (I). С.125–139. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.01>
16. Aburasain Y., Bilal M., Kim K. Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems Through Neural Network Integration with Kalman and Alpha-Beta Filters // PLOS ONE. 2024. Vol. 19, No. 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>
17. Neural Kalman: A Learnable Kalman Filter for Acoustic Echo Cancellation / Y. Zhang, Yu. Meng & H. Zhang, et al. // In IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU). 2023. <https://doi.org/10.1109/asru57964.2023.10389780>
18. Narendra K. S., Parthasarathy K. Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks // IEEE Transactions on Neural Networks. 1990. Vol. 1, Iss. 1. P. 4–27. <https://doi.org/10.1109/72.80202>
19. Billings S. A. Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains. Chichester : Wiley, 2013. 574 p. <https://doi.org/10.1002/9781118535561>
20. Alberts T., Landman D., Hou G. Implementation of an Extended Kalman Filter Using Inertial Sensor Data for UAVs During GPS Denied Applications // Master of Science, Thesis, Mechanical & Aerospace Engineering. Old Dominion University, 2022. <https://doi.org/10.25777/f3f4-b307>

21. Black M. J., Anandan P. The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piecewise-Smooth Flow Fields // *Computer Vision and Image Understanding*. 1996. Vol. 63, No. 1. P. 75–104. <https://doi.org/10.1006/cviu.1996.0006>
22. Maybeck P. S., Stevens R. C. Adaptive Multiple Model Kalman Filtering // *Proceedings of the IEEE*. 1991. Vol. 79, No. 6. P. 940–952. <https://doi.org/10.1109/5.90110>
23. Wang J., Han S., Meng X. IMM-Based Adaptive Robust Kalman Filter for UAV Navigation in GNSS-Challenged Environments // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 6. Art. 1694. <https://doi.org/10.3390/s20061694>
24. Negara L., Wustqa D. Prediction of Crude Palm Oil Production Using Nonlinear Autoregressive Exogenous Neural Network with Genetic Algorithm // *AIP Conference Proceedings*. 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0107898>
25. Buitrago J., Asfour S. Short-Term Forecasting of Electric Loads Using Nonlinear Autoregressive Artificial Neural Networks with Exogenous Inputs // *Energies*. 2017. Vol. 10, No. 11. <https://doi.org/10.3390/en10010040>

Стаття надійшла до редакції 28.01.2026.

Прийнято до друку 27.02.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Sjöberg, P. (2018). *Design and Implementation of an Exogenous Kalman Filter for UAVs*. KTH Royal Institute of Technology. Retrived from <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1232900/FULLTEXT01.pdf>
2. Wen, W., Pfeifer, T., Bai, X., & Hsu, L.-T. (2021). Factor Graph Optimization for GNSS / INS Integration: A Comparison with the Extended Kalman Filter. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 68, 2, 315–331. <https://doi.org/10.1002/navi.421>
3. Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82, 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
4. Bhatt, D., Aggarwal, P., Devabhaktuni, V., & Bhattacharya, P. (2014). A Novel Hybrid Fusion Algorithm to Bridge the Period of GPS Outages Using Low Cost INS. *Expert Systems with Applications*, 41, 5, 2166–2173. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.09.015>
5. Peter J. Huber. (1981). *Robust Statistics*. New York. <https://doi.org/10.1002/0471725250>
6. Hampel, F. R., Ronchetti, E. M., Rousseeuw, P. J., & Stahel, W. A. (1986). *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*. New York.
7. Zhang, Y., Yu, F., Gao, W., & Wang, Y. (2018). An Improved Strapdown Inertial Navigation System Initial Alignment Algorithm for Unmanned Vehicles. *Sensors*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/s18103297>
8. Akhlaghi, S., Zhou, N., & Huang, Z. (2017). Adaptive Adjustment of Noise Covariance in Kalman Filter for Dynamic State Estimation. In *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8273755>
9. Wang, X., Wang, A., Xiong, Y., & Liang, B. (2022). A Modified Sage-Husa Adaptive Kalman Filter for State Estimation of Electric Vehicle Servo Control System. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.105>

10. Genovese, A. (2021). *The Interacting Multiple Model Algorithm for Accurate State Estimation of Maneuvering Targets*. Retrived from <https://secwww.jhuapl.edu/techdigest/content/techdigest/pdf/V22-N04/22-04-Genovese.pdf>
11. Zhang, T., Zong, Q., & Liu, X. (2019). Adaptive IMM Algorithm for Multi-Mode Integrated Navigation System under GNSS Degradation. *Aerospace Science and Technology*, 92, 593–602. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.06.027>
12. Motsnyi, F. V. (2018). Analiz neparametrychnykh i parametrychnykh kryteriiv perevirky statystychnykh hipotez. Ch. I. Kryterii uzghodzhennia Pirsona i Kolmogorova [Analysis of Nonparametric and Parametric Criteria for Testing Statistical Hypotheses. Part I. Pearson and Kolmogorov Agreement Criteria]. *Statystyka Ukrainy [Statistics of Ukraine]*, 4 (83). [https://doi.org/10.31767/su.4\(83\)2018.04.02](https://doi.org/10.31767/su.4(83)2018.04.02) [in Ukrainian].
13. Sun, K., & Gebre-Egziabher, D. (2021). Air Data Fault Detection and Isolation for Small Unmanned Aircraft Using an Integrity Monitoring Framework. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 68, 2, 431–447. <https://doi.org/10.1002/navi.414>
14. Alsamamra, H., & Salah, S. (2024). Performance Analysis of ARIMA Model for Wind Speed Forecasting. *Simulation Modelling Practice and Theory*. <https://doi.org/10.1177/01445987241248201>
15. Romanko, V. A., & Sribnyi, O. M. (2025). Intehratsiia neuronnoho filtra Kalmana v systemu navedennia vysokodynamichnykh aparativ [Integration of a Neural Kalman Filter into Guidance of High-Dynamic Platforms]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system : zb. nauk. Prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29 (I), 125–139. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.01> [in Ukrainian].
16. Aburasain, Y., Bilal, M., & Kim, K. (2024). Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems Through Neural Network Integration with Kalman and Alpha-Beta Filters. *PLOS ONE*, 19, 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>
17. Zhang, Y., Meng, Yu & Zhang, H., et al. (2023). Neural Kalman: A Learnable Kalman Filter for Acoustic Echo Cancellation. In *IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU)*. <https://doi.org/10.1109/asru57964.2023.10389780>
18. Narendra, K. S., & Parthasarathy, K. (1990). Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1, 1, 4–27. <https://doi.org/10.1109/72.80202>
19. Billings, S. A. (2013). *Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains*. Chichester. <https://doi.org/10.1002/9781118535561>
20. Alberts, T., Landman, D., & Hou, G. (2022). Implementation of an Extended Kalman Filter Using Inertial Sensor Data for UAVs During GPS Denied Applications. *Master of Science, Thesis, Mechanical & Aerospace Engineering*. Old Dominion University. <https://doi.org/10.25777/f3f4-b307>
21. Black, M. J., & Anandan, P. (1996). The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piecewise-Smooth Flow Fields. *Computer Vision and Image Understanding*, 63, 1, 75–104. <https://doi.org/10.1006/cviu.1996.0006>

22. Maybeck, P. S., & Stevens, R. C. (1991). Adaptive Multiple Model Kalman Filtering. *Proceedings of the IEEE*, 79, 6, 940–952. <https://doi.org/10.1109/5.90110>
23. Wang, J., Han, S., & Meng, X. (2020). IMM-Based Adaptive Robust Kalman Filter for UAV Navigation in GNSS-Challenged Environments. *Sensors*, 20, 6, Art.1694. <https://doi.org/10.3390/s20061694>
24. Negara, L., & Wustqa, D. (2020). Prediction of Crude Palm Oil Production Using Nonlinear Autoregressive Exogenous Neural Network with Genetic Algorithm. In *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0107898>
25. Buitrago, J., & Asfour, S. (2017). Short-Term Forecasting of Electric Loads Using Nonlinear Autoregressive Artificial Neural Networks with Exogenous Inputs. *Energies*, 10, 11. <https://doi.org/10.3390/en10010040>

M. O. Humeniuk, S. P. Overchuk, A. O. Tkach

ANALYSIS OF APPROACHES TO IMPROVING THE ACCURACY OF NAVIGATION INFORMATION PROCESSING IN ONBOARD SUBSYSTEMS OF CLASS I UNMANNED AERIAL VEHICLES UNDER ELECTRONIC WARFARE CONDITIONS

The article considers modern approaches to improving the accuracy of navigation information in class I unmanned aerial vehicles operating in conditions of electronic jamming. It is shown that navigation accuracy is critical for performing reconnaissance and tactical tasks, and the impact of electronic jamming means leads to degradation of GNSS signals and rapid accumulation of errors in the existing micro-electromechanical sensors of the inertial navigation system. The main sources of errors in navigation subsystems are characterized, in particular, stochastic noise, systematic drifts and non-stationary disturbances, which are significantly amplified in the event of loss of satellite correction.

The key groups of navigation filtering methods are analyzed: the Kalman filter and its modifications, robust approaches to reduce the impact of anomalous measurements, adaptive methods for adjusting to changes in noise characteristics, and multi-model IMM algorithms that allow adaptive switching between operating modes. Mechanisms for detecting unreliable GNSS measurements based on the χ^2 -criterion and approaches to predicting the impact of atmospheric disturbances using ARIMA models are also considered.

Special attention is paid to the nonlinear time models NAR and NARX, which demonstrate a significantly higher ability to reproduce the complex dynamics of inertial navigation system errors and non-stationary external influences compared to linear methods. It is emphasized that these models have the potential to significantly improve the accuracy of navigation solutions in the degradation or complete absence of GNSS. At the same time, their effective implementation requires further research aimed at optimizing the architecture of neural networks, reducing computational costs and ensuring the stability of real-time forecasting. The development of NAR / NARX models is a promising direction that can become a key component of future navigation systems for Class I unmanned aerial vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; inertial navigation; accuracy; electronic jamming; Kalman filter; robust methods; adaptive filtering; IMM; ARIMA; NAR / NARX.*

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.02

УДК 004.056.55:004.312.2

В. М. Рудницький, д-р техн. наук, проф.
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки
<https://orcid.org/0000-0003-3473-7433>

В. В. Ларін, канд. техн. наук, доц.
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки
<https://orcid.org/0000-0003-0771-2660>

С. А. Тристан
EPAM Systems, Inc.
<https://orcid.org/0009-0004-5496-1517>

П. М. Піонтківський, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0000-0002-9103-5393>

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ РОЗШИРЕНОГО МАТРИЧНОГО КРИПТОПЕРЕТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНО-КАЗУАЛЬНОЇ ЛОГІКИ

У статті розглянуто можливість побудови моделей SET-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення. Відповідність прямих та обернених операцій перевірено на основі взаємозв'язків між ними.

Проведено дослідження операцій розширеного матричного криптоперетворення із застосуванням дискретно-казуальної логіки. Побудовано множини двохоперандних трирозрядних SET-операцій криптоперетворення шляхом поєднання однооперандних дворозрядних SET-операцій.

Виявлено, що дискретно-казуальне моделювання належить до апарату моделювання, який дозволяє описувати на його основі всі елементарні функції та SET-операції, за допомогою яких будуються криптографічні системи потокового шифрування.

Розроблено моделі, які підтверджують гіпотезу, що SET-операції розширеного матричного криптографічного перетворення можна розглядати як операції нелінійного перетворення. Встановлено, що отримана дискретно-казуальна модель розширеного матричного криптографічного перетворення реалізує чотири вироджені матриці, які вибираються залежно від значень вхідних змінних.

Доведено, що SET-операції розширеного матричного криптографічного перетворення керовані інформацією. Акцентовано на тому, що застосування дискретно-казуального моделювання дозволяє однотипно описувати всі елементарні функції, на основі яких будуються SET-операції. Крім того, з'ясовано, що дискретно-казуальне моделювання дозволяє розширити можливості дослідження елементарних функцій і SET-операцій.

© В. М. Рудницький, В. В. Ларін, С. А. Тристан, П. М. Піонтківський, 2026

Сферою використання отриманих результатів дослідження можуть бути мобільні та стаціонарні системи малоресурсного криптографічного захисту конфіденційної інформації, шифросистеми, криптографічні протоколи тощо.

Ключові слова: *дискретно-казуальна модель; потокове шифрування; SET-шифрування; SET-операції; двохоперандні трирозрядні операції; однооперандні операції.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасних умовах використання безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) і робототехніки стало звичайною нормою. За їх допомогою вирішуються завдання з організації та забезпечення безпеки інформаційного ресурсу, а також питання в дослідницькій, охоронній та інших галузях.

У боротьбі з військовим агресором це новітнє озброєння та військова техніка стають усе більш ефективними й регулярно застосовуваними. Водночас і противник усе активніше задіює БпАК в своїй деструктивній діяльності. Саме тому дослідження питань про застосування БпАК та протидію їм необхідно вести паралельно.

Поява великої кількості розробників і виробників БпАК має низку причин. Зазначені комплекси, як правило, набагато дешевші за пілотовані літаки й вертольоти. Підготовка оператора безпілотної системи менш дороговартісна, ніж льотчика. Крім того, відсутність пілота дозволяє зменшити масу та габарити БпАК, збільшити діапазон допустимих перевантажень тощо.

Значущим є і фактор безпеки: втрата безпілотних апаратів не призводить до загибелі пілотів. Однак під час використання безпілотної авіації виникає ціла низка проблем, адже доступ до каналів передачі інформації можуть отримати і неавторизовані користувачі для задоволення своїх власних потреб. Як і проводові мережі, БпАК потрапляють під вплив різних атак. Актуальність застосування шифрування каналів управління та передачі спеціальної інформації БпАК зумовлена високою ймовірністю перехоплення команд управління, підміни телеметричних даних та несанкціонованого доступу до службової інформації противником. Удосконалення криптографічних методів захисту дозволить забезпечити конфіденційність, цілісність і автентичність переданих даних. Крім того, шифрування каналів зв'язку підвищує стійкість БпАК до впливу противника, що є критично важливим під час виконання бойових та спеціальних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1–4, 24] наведено основні вимоги до кодування обладнання БпАК, а також варіант побудови системи криптографії та передавання даних. У [6–9] розглянуто порівняльні характеристики та можливості різних стандартів захисту інформації в каналах управління та зв'язку, основні параметри, яким мають відповідати канал безпекового зв'язку й окремі елементи бортового обладнання БпАК.

Одним із провідних напрямів захисту інформації був і залишається криптографічний [9]. За останні десятиріччя системи криптографічного захисту набули значного розвитку [10–11]. Передові наукові дослідження в галузі криптографії провадяться в контексті квантових та постквантових технологій, малоресурсності, криптографічного кодування [12–16]. У [17, 22] запропоновано використовувати дискретно-казуальне подання моделей елементарних функцій і SET-операцій, зокрема й SET-операцій, керованих інформацією.

Проте можливість моделювання операції розширеного матричного криптографічного перетворення на сьогоднішній день не досліджувалася.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є дослідження можливості дискретно-казуального моделювання операції розширеного матричного криптографічного перетворення для збільшення можливостей і уніфікації побудови, а також вивчення криптографічних систем потокового SET-шифрування, множин двооперандних трирозрядних SET-операцій криптоперетворення, отриманих за допомогою поєднання однооперандних дворозрядних SET-операцій.

Виклад основного матеріалу. 3-поміж SET-операцій особливе місце займають операції розширеного матричного криптографічного перетворення, які прийнято вважати нелінійними, хоча на сьогодні це не доведено.

SET-операції розширеного матричного криптографічного перетворення будуються на основі елементарних функцій розширеного матричного криптографічного перетворення [18], наведених у табл. 1 [19, 23, 24].

Таблиця 1

Елементарні функції розширеного матричного криптографічного перетворення

| Пряма елементарна операція | | | Обернена елементарна операція | | |
|----------------------------|-----|---|-------------------------------|-----|---|
| Код | | Опис | Код | | Опис |
| 0001 1110 | 30 | $f_{30} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ | 1110 0001 | 225 | $f_{225} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| 0011 0110 | 54 | $f_{54} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 1100 1001 | 201 | $f_{201} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| 0011 1001 | 57 | $f_{57} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1100 0110 | 198 | $f_{198} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| 0100 1011 | 75 | $f_{75} = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 1011 0100 | 180 | $f_{180} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| 0101 0110 | 86 | $f_{86} = \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1010 1001 | 169 | $f_{169} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| 0101 1001 | 89 | $f_{89} = \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1010 0110 | 166 | $f_{166} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ |
| 0110 0011 | 99 | $f_{99} = x_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 1001 1100 | 156 | $f_{156} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| 0110 0101 | 101 | $f_{101} = x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1001 1010 | 154 | $f_{154} = x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| 0110 1010 | 106 | $f_{106} = x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 1001 0101 | 149 | $f_{149} = x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| 0110 1100 | 108 | $f_{108} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1001 0011 | 147 | $f_{147} = x_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| 0111 1000 | 120 | $f_{120} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1000 0111 | 135 | $f_{135} = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| 0010 1101 | 45 | $f_{45} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 1101 0010 | 210 | $f_{210} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ |

Моделювання СЕТ-операцій проводилося на основі дискретного або дискретно-модульного подання елементарних функцій [20, 21]. Дані моделювання елементарних функцій розширеного матричного криптографічного перетворення наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Моделі елементарних функцій СЕТ-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення

| Моделі елементарних функцій | | | Моделі елементарних функцій | | |
|-----------------------------|-----|---|-----------------------------|-----|---|
| 00011110 | 30 | $f_{30} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ | 11100001 | 225 | $f_{225} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| | | $f_{30} = x_1 \oplus (x_2 \cdot x_3)$ | | | $f_{225} = \bar{x}_1 \oplus (x_2 \cdot x_3)$ |
| 00101101 | 45 | $f_{45} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 11010010 | 210 | $f_{210} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{45} = x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3)$ | | | $f_{210} = \bar{x}_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3)$ |
| 00110110 | 54 | $f_{54} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 11001001 | 201 | $f_{201} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{54} = x_2 \oplus (x_1 \cdot x_3)$ | | | $f_{201} = \bar{x}_2 \oplus (x_1 \cdot x_3)$ |
| 00111001 | 57 | $f_{57} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 11000110 | 198 | $f_{198} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{57} = x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3)$ | | | $f_{198} = \bar{x}_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3)$ |
| 01001011 | 75 | $f_{75} = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 10110100 | 180 | $f_{180} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{75} = x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3)$ | | | $f_{180} = \bar{x}_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3)$ |
| 01010110 | 86 | $f_{86} = \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10101001 | 169 | $f_{169} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| | | $f_{86} = x_3 \oplus (x_1 \cdot x_2)$ | | | $f_{169} = \bar{x}_3 \oplus (x_1 \cdot x_2)$ |
| 01011001 | 89 | $f_{89} = \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10100110 | 166 | $f_{166} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ |
| | | $f_{89} = x_3 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_2)$ | | | $f_{166} = \bar{x}_3 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_2)$ |
| 01100011 | 99 | $f_{99} = x_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 10011100 | 156 | $f_{156} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| | | $f_{99} = x_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_3)$ | | | $f_{156} = \bar{x}_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_3)$ |
| 01100101 | 101 | $f_{101} = x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10011010 | 154 | $f_{154} = x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ |
| | | $f_{101} = x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2)$ | | | $f_{154} = \bar{x}_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2)$ |
| 01101010 | 106 | $f_{106} = x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 10010101 | 149 | $f_{149} = x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{106} = \bar{x}_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)$ | | | $f_{149} = x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)$ |
| 01101100 | 108 | $f_{108} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10010011 | 147 | $f_{147} = x_1 \cdot x_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{108} = \bar{x}_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)$ | | | $f_{147} = x_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)$ |
| 01111000 | 120 | $f_{120} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10000111 | 135 | $f_{135} = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ |
| | | $f_{120} = \bar{x}_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)$ | | | $f_{135} = x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)$ |

Базисом забезпечення гарантованого захисту інформаційного ресурсу, який циркулює в інформаційно-телекомунікаційних системах у режимі реального часу, є криптографічні методи та засоби захисту інформації.

Обмеженнями в ході дослідження є операції криптографічного перетворення, побудовані на основі додавання за модулем два.

Одноопераційні операції розширеного матричного криптографічного перетворення [1, 20, 24] описані виразами (1)–(3).

$$C_{30,57,149}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot x_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) \end{bmatrix}; \quad C_{45,54,149}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$C_{75,57,101}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2) \end{bmatrix}; \quad C'_{75,57,101}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$C_{135,54,101}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot x_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2) \end{bmatrix}; \quad C'_{135,99,101}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot x_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Проте цей математичний апарат моделювання не сумісний з апаратом моделювання інших груп СЕТ-операцій, наприклад, матричних; операцій переставлянь, керованих інформацією; операцій на основі елементарних функцій; операцій, керованих інформацією. Зазначені групи операцій відповідно до [1, 7–12] були реалізовані на основі дискретно-казуального моделювання.

Дослідимо на основі таблиць істинності елементарних функцій розширеного матричного криптографічного перетворення дискретно-казуальні моделі.

Дискретно-казуальна модель (4) є казуальним поєднанням трьох дискретних функцій [19–24]:

$$f(x) = (f_1(x))(f_2(x))(f_3(x)), \quad (4)$$

де $f_2(x)$ – функція керування;

$f_1(x)$ і $f_3(x)$ – перша і друга функції перетворення.

За умови $f_2(x) = 0$ буде виконуватися перша функція перетворення ($f_1(x)$), інакше – друга функція перетворення ($f_3(x)$).

Елементарну функцію переставляння, керовану інформацією, відповідно до (4) можна описати моделлю

$$f(x) = (x_1)(x_2)(x_3). \quad (5)$$

Для вдосконалення методів синтезу елементарних функцій і СЕТ-операцій переставлянь, керованих інформацією, необхідні такі властивості дискретно-казуальної моделі (4):

1) інверсія результату реалізації функції керування зумовить переставляння місцями функцій перетворення: $f(x) = (f_1(x))(f_2(x))(f_3(x)) = (f_3(x))(\overline{f_2(x)})(f_1(x))$;

2) інверсія результатів реалізації функцій перетворення спричинить інверсію реалізації моделі: $(\overline{f_1(x)})(f_2(x))(\overline{f_3(x)}) = \overline{f(x)}$.

Елементарні функції переставлянь, які керуються інформацією (дискретно-казуальні моделі), наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Елементарні функції переставлянь, які керуються інформацією (дискретно-казуальні моделі)

| № функції | Результат виконання | Дискретна модель | № функції | Результат виконання | Дискретна модель |
|-----------|---------------------|--------------------------------|-----------|---------------------|--------------------------------------|
| 83 | 01010011 | $f(x) = (x_3)(x_1)(x_2)$ | 197 | 11000101 | $f(x) = (\bar{x}_2)(x_1)(x_3)$ |
| 163 | 10100011 | $f(x) = (\bar{x}_3)(x_1)(x_2)$ | 202 | 11001010 | $f(x) = (\bar{x}_2)(x_1)(\bar{x}_3)$ |
| 46 | 00101110 | $f(x) = (x_1)(x_2)(\bar{x}_3)$ | 209 | 11010001 | $f(x) = (\bar{x}_1)(x_2)(x_3)$ |
| 71 | 01000111 | $f(x) = (x_3)(x_2)(x_1)$ | 226 | 11100010 | $f(x) = (\bar{x}_1)(x_2)(\bar{x}_3)$ |
| ... | ... | | | | |

Однооперандні операції переставлянь, керовані інформацією, описано виразами (6)–(7):

$$C_{39,58,116}(x) = \begin{bmatrix} (x_2)(x_3)(x_1) \\ (x_2)(x_1)(\bar{x}_3) \\ (x_3)(x_2)(\bar{x}_1) \end{bmatrix}; \quad C'_{39,58,116}(x) = C_{46,27,92}(x) = \begin{bmatrix} (x_1)(x_2)(\bar{x}_3) \\ (x_1)(x_3)(x_2) \\ (x_3)(x_1)(\bar{x}_2) \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$C_{39,85,27}(x) = \begin{bmatrix} (x_2)(x_3)(x_1) \\ (x_3)(x_1)(x_3) \\ (x_1)(x_3)(x_2) \end{bmatrix}; \quad C'_{39,85,27}(x) = C_{71,29,51}(x) = \begin{bmatrix} (x_3)(x_2)(\bar{x}_1) \\ (x_1)(x_2)(x_3) \\ (x_2)(x_1)(x_2) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Тоді подамо групу елементарних функцій операцій, керованих інформацією, у табл. 4.

Таблиця 4

Група елементарних функцій операцій, керованих інформацією

| Елементарна функція | Результат реалізації | Елементарна функція | Результат реалізації |
|---|----------------------|---|----------------------|
| $f_{23} = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3$ | 00010111 | $f_{232} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 11101000 |
| $f_{43} = x_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 00101011 | $f_{212} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 11010100 |
| $f_{77} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot x_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3$ | 01001101 | $f_{178} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10110010 |
| $f_{113} = \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot x_3$ | 01110001 | $f_{142} = x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3$ | 10001110 |

Дискретно-казуальні моделі елементарних функцій операцій, керованих інформацією, наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Дискретно-казуальні моделі елементарних функцій операцій,
керованих інформацією

| Моделі прямих елементарних функцій | Моделі обернених елементарних функцій |
|--|--|
| $f_{23} = (x_2 \cdot x_3)(x_1)(x_2 \vee x_3)$ | $f_{232} = (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)$ |
| $f_{23} = (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \vee x_3)$ | $f_{232} = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3)(x_2)(\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)$ |
| $f_{23} = (x_1 \cdot x_2)(x_3)(x_1 \vee x_2)$ | $f_{232} = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)(x_3)(\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)$ |
| $f_{43} = (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3)$ | $f_{212} = (\bar{x}_2 \vee x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \cdot x_3)$ |
| $f_{43} = (x_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(x_1 \vee \bar{x}_3)$ | $f_{212} = (\bar{x}_1 \vee x_3)(x_2)(\bar{x}_1 \cdot x_3)$ |
| $f_{43} = (x_1 \vee x_2)(x_3)(x_1 \cdot x_2)$ | $f_{212} = (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)$ |
| $f_{77} = (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3)$ | $f_{178} = (x_2 \vee \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \cdot \bar{x}_3)$ |
| $f_{77} = (x_1 \vee x_3)(x_2)(x_1 \cdot x_3)$ | $f_{178} = (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3)(x_2)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3)$ |
| $f_{77} = (x_1 \cdot \bar{x}_2)(x_3)(x_1 \vee \bar{x}_2)$ | $f_{178} = (\bar{x}_1 \vee x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \cdot x_2)$ |
| $f_{113} = (x_2 \vee x_3)(x_1)(x_2 \cdot x_3)$ | $f_{142} = (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3)$ |
| $f_{113} = (\bar{x}_1 \cdot x_3)(x_2)(\bar{x}_1 \vee x_3)$ | $f_{142} = (x_1 \vee \bar{x}_3)(x_2)(x_1 \cdot \bar{x}_3)$ |
| $f_{113} = (\bar{x}_1 \cdot x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee x_2)$ | $f_{142} = (x_1 \vee \bar{x}_2)(x_3)(x_1 \cdot \bar{x}_2)$ |

Однооперандні операції на основі елементарних функцій операцій, керованих інформацією, описано виразами (8)–(9):

дискретно-казуальна модель прямої SET-операції –

$$C(x) = \begin{bmatrix} (x_2 \cdot \bar{x}_3)(x_1)(x_2 \vee \bar{x}_3) \\ (\bar{x}_1 \cdot x_3)(x_2)(\bar{x}_1 \vee x_3) \\ (x_1 \cdot x_2)(x_3)(x_1 \vee x_2) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

дискретно-казуальна модель оберненої SET-операції –

$$C'(x) = \begin{bmatrix} (\bar{x}_2 \cdot x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \vee x_3) \\ (x_1 \cdot x_3)(x_2)(x_1 \vee x_3) \\ (\bar{x}_1 \cdot x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \vee x_2) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Операції розширеного матричного криптографічного перетворення не розглядалися так, як операції, керовані інформацією.

Побудуємо дискретно-казуальні моделі елементарних функцій SET-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення. Результати, описані дискретно-казуальними моделями операцій розширеного матричного криптографічного перетворення, наведено в табл. 6.

Отримані результати побудови та взаємоперетворення дискретно-казуальних моделей елементарних функцій СЕТ-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення наведено в табл. 7.

Таблиця 6

Дискретно-казуальні моделі елементарних функцій СЕТ-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення

| | | | | | | | |
|--|----|----------|----|--|----|----------|----|
| 00011110 | 30 | 00011110 | 30 | 00011110 | 30 | 00011110 | 30 |
| 000 | 0 | 000 | 0 | 000 | 0 | 000 | 0 |
| 001 | 0 | 001 | 0 | 001 | 0 | 010 | 0 |
| 010 | 0 | 100 | 1 | 010 | 0 | 100 | 1 |
| 011 | 1 | 101 | 1 | 011 | 1 | 110 | 1 |
| 100 | 1 | 010 | 0 | 100 | 1 | 001 | 0 |
| 101 | 1 | 011 | 1 | 101 | 1 | 011 | 1 |
| 110 | 1 | 110 | 1 | 110 | 1 | 101 | 1 |
| 111 | 0 | 111 | 0 | 111 | 0 | 111 | 0 |
| $f_{30}(x) = (x_1)(x_2)(x_1 \oplus x_3)$ | | | | $f_{30}(x) = (x_1)(x_3)(x_1 \oplus x_2)$ | | | |
| $f_{30} = x_1 \oplus (x_2 \cdot x_3) = (x_1)(x_2)(x_1 \oplus x_3) = (x_1)(x_3)(x_1 \oplus x_2)$ | | | | | | | |
| 00101101 | 45 | 00101101 | 45 | 00101101 | 45 | 00101101 | 45 |
| 000 | 0 | 000 | 0 | 000 | 0 | 000 | 0 |
| 001 | 0 | 001 | 0 | 001 | 0 | 010 | 1 |
| 010 | 1 | 100 | 1 | 010 | 1 | 100 | 1 |
| 011 | 0 | 101 | 1 | 011 | 0 | 110 | 0 |
| 100 | 1 | 010 | 1 | 100 | 1 | 001 | 0 |
| 101 | 1 | 011 | 0 | 101 | 1 | 011 | 0 |
| 110 | 0 | 110 | 0 | 110 | 0 | 101 | 1 |
| 111 | 1 | 111 | 1 | 111 | 1 | 111 | 1 |
| $f_{45}(x) = (x_1)(x_2)(x_1 \equiv x_3)$ $f_{45}(x) = (x_1)(x_2)(x_1 \equiv x_3)$ $= (x_1)(x_2)(x_1 \oplus \bar{x}_3)$ | | | | $f_{45}(x) = (x_1 \oplus x_2)(x_3)(x_1)$ $f_{45}(x) = (x_1 \oplus x_2)(x_3)(x_1)$ $= (x_1)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus x_2)$ | | | |
| $f_{45} = x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3)$ $f_{45} = x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3) = (x_1)(x_2)(x_1 \oplus \bar{x}_3) = (x_1)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus x_2)$ | | | | | | | |
| 01001011 | 75 | 01001011 | 75 | 01001011 | 75 | 01001011 | 75 |
| 000 | 0 | 000 | 0 | 000 | 0 | 000 | 0 |
| 001 | 1 | 001 | 1 | 001 | 1 | 010 | 0 |
| 010 | 0 | 100 | 1 | 010 | 0 | 100 | 1 |
| 011 | 0 | 101 | 0 | 011 | 0 | 110 | 1 |
| 100 | 1 | 010 | 0 | 100 | 1 | 001 | 1 |
| 101 | 0 | 011 | 0 | 101 | 0 | 011 | 0 |
| 110 | 1 | 110 | 1 | 110 | 1 | 101 | 0 |
| 111 | 1 | 111 | 1 | 111 | 1 | 111 | 1 |
| $f_{75}(x) = (x_1 \oplus x_3)(x_2)(x_1)$ $= (x_1)(\bar{x}_2)(x_1 \oplus x_3)$ | | | | $f_{75}(x) = (x_1)(x_3)(x_1 \equiv x_2)$ $= (x_1)(x_3)(x_1 \oplus \bar{x}_2)$ | | | |
| $f_{75} = x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3)$ $f_{75} = x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3) = (x_1)(\bar{x}_2)(x_1 \oplus x_3) = (x_1)(x_3)(x_1 \oplus \bar{x}_2)$ | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Результати побудови та взаємоперетворення дискретно-казуальних моделей елементарних функцій SET-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення

| |
|---|
| $f_{30}(x) = x_1 \oplus (x_2 \cdot x_3) = (x_1)(x_2)(x_1 \oplus x_3) = (x_1)(x_3)(x_1 \oplus x_2)$ $f_{54}(x) = x_2 \oplus (x_1 \cdot x_3) = (x_2)(x_1)(x_2 \oplus x_3) = (x_2)(x_3)(x_1 \oplus x_2)$ $f_{86}(x) = x_3 \oplus (x_1 \cdot x_2) = (x_3)(x_1)(x_2 \oplus x_3) = (x_3)(x_2)(x_1 \oplus x_3)$ |
| $f_{45}(x) = x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3) = (x_1)(x_2)(x_1 \oplus \bar{x}_3) = (x_1)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus x_2)$ $f_{57}(x) = x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) = (x_2)(x_1)(x_2 \oplus \bar{x}_3) = (x_2)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus x_2)$ $f_{89}(x) = x_3 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_2) = (x_3)(x_1)(\bar{x}_2 \oplus x_3) = (x_3)(\bar{x}_2)(x_1 \oplus x_3)$ |
| $f_{75}(x) = x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3) = (x_1)(\bar{x}_2)(x_1 \oplus x_3) = (x_1)(x_3)(x_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{99}(x) = x_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_3) = (x_2)(\bar{x}_1)(x_2 \oplus x_3) = (x_2)(x_3)(\bar{x}_1 \oplus x_2)$ $f_{101}(x) = x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2) = (x_3)(\bar{x}_1)(x_2 \oplus x_3) = (x_3)(x_2)(\bar{x}_1 \oplus x_3)$ |
| $f_{135}(x) = x_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3) = (x_1)(\bar{x}_2)(x_1 \oplus \bar{x}_3) = (x_1)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{147}(x) = x_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3) = (x_2)(\bar{x}_1)(x_2 \oplus \bar{x}_3) = (x_2)(\bar{x}_3)(\bar{x}_1 \oplus x_2)$ $f_{149}(x) = x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) = (x_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \oplus x_3) = (x_3)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \oplus x_3)$ |
| $f_{225}(x) = \bar{x}_1 \oplus (x_2 \cdot x_3) = (\bar{x}_1)(x_2)(\bar{x}_1 \oplus x_3) = (\bar{x}_1)(x_3)(\bar{x}_1 \oplus x_2)$ $f_{201}(x) = \bar{x}_2 \oplus (x_1 \cdot x_3) = (\bar{x}_2)(x_1)(\bar{x}_2 \oplus x_3) = (\bar{x}_2)(x_3)(x_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{169}(x) = \bar{x}_3 \oplus (x_1 \cdot x_2) = (\bar{x}_3)(x_1)(x_2 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_3)(x_2)(x_1 \oplus \bar{x}_3)$ |
| $f_{210}(x) = \bar{x}_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3) = (\bar{x}_1)(x_2)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_1)(\bar{x}_3)(\bar{x}_1 \oplus x_2)$ $f_{198}(x) = \bar{x}_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) = (\bar{x}_2)(x_1)(\bar{x}_2 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_2)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{166}(x) = \bar{x}_3 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_2) = (\bar{x}_3)(x_1)(\bar{x}_2 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_3)(\bar{x}_2)(x_1 \oplus \bar{x}_3)$ |
| $f_{180}(x) = \bar{x}_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot x_3) = (\bar{x}_1)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \oplus x_3) = (\bar{x}_1)(x_3)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{156}(x) = \bar{x}_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_3) = (\bar{x}_2)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \oplus x_3) = (\bar{x}_2)(x_3)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{154}(x) = \bar{x}_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot x_2) = (\bar{x}_3)(\bar{x}_1)(x_2 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_3)(x_2)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_3)$ |
| $f_{120}(x) = \bar{x}_1 \oplus (\bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3) = (\bar{x}_1)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_1)(\bar{x}_3)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{108}(x) = \bar{x}_2 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_3) = (\bar{x}_2)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_2)(\bar{x}_3)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_2)$ $f_{106}(x) = \bar{x}_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) = (\bar{x}_3)(\bar{x}_1)(\bar{x}_2 \oplus \bar{x}_3) = (\bar{x}_3)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_3)$ |

Дослідження дискретно-казуальних моделей SET-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення

Побудову і аналіз дискретно-казуальних моделей SET-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення розглянемо на прикладі (10):

$$C_{30,57,149}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot x_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) \end{bmatrix}; \quad C'_{30,57,149}(x) = C_{45,54,149}(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus (x_2 \cdot \bar{x}_3) \\ x_2 \oplus (x_1 \cdot \bar{x}_3) \\ x_3 \oplus (\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Дискретно-казуальну модель прямої SET-операції розширеного матричного криптографічного перетворення описано виразом (11):

$$C_{30,57,149}(x) = \begin{bmatrix} (x_1)(x_3)(x_1 \oplus x_2) \\ (x_2)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus x_2) \\ (x_3)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \oplus x_3) \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \\ \bar{x}_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 0; x_3 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \\ \bar{x}_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 0; x_3 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus 1 \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 1; x_3 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 1; x_3 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Дискретно-казуальна модель оберненої SET-операції розширеного матричного криптографічного перетворення описана виразом (12):

$$C'_{30,57,149}(x) = C_{45,54,149}(x) = \begin{bmatrix} (x_1)(\bar{x}_3)(x_1 \oplus x_2) \\ (x_2)(x_3)(x_1 \oplus x_2) \\ (x_3)(\bar{x}_2)(\bar{x}_1 \oplus x_3) \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ 0 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 0; x_3 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 0; x_3 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 1; x_3 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_1 \oplus x_2 \\ 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } x_2 = 1; x_3 = 1. \end{cases} \quad (12)$$

Отже, описані дискретно-казуальні моделі прямої й оберненої SET-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення дозволяють зробити такі висновки:

1. Наведену дискретно-казуальну модель розширеного матричного криптографічного перетворення $C_{30,57,149}(x)$ можна розглядати як модель, яка реалізує чотири вироджені матриці, що вибираються залежно від значень вхідних змінних x_2 і x_3 .

2. Оскільки операція $C_{30,57,149}(x)$ несиметрична, то й реалізовані нею матриці будуть виродженими.

3. Для несиметричної операції $C_{30,57,149}(x)$ є обернена операція $C'_{30,57,149}(x) = C_{45,54,149}(x)$, яка також несиметрична.

4. Обернена операція $C'_{30,57,149}(x) = C_{45,54,149}(x)$ реалізує також чотири вироджені матриці.

Застосування дискретно-казуального моделювання дозволяє реалізувати однотипний опис усіх елементарних функцій, на основі яких будуються SET-операції. Крім того, як

показали отримані результати, дискретно-казуальне моделювання дозволяє розширити можливості дослідження елементарних функцій і СЕТ-операцій.

Висновки. У роботі досліджено можливості застосування апарату дискретно-казуального моделювання для побудови та аналізу СЕТ-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення. На основі аналізу таблиць істинності елементарних функцій розширеного матричного криптографічного перетворення побудовано відповідні дискретно-казуальні моделі, які забезпечують формалізований опис прямих і обернених криптографічних перетворень. Встановлено відповідність між прямими та оберненими СЕТ-операціями, що підтверджує коректність побудованих моделей.

Проведене дослідження показало, що СЕТ-операції розширеного матричного криптографічного перетворення доцільно описувати у вигляді дискретно-казуальних моделей, у яких вибір елементарної функції перетворення здійснюється залежно від значень керівних змінних. Це дозволяє розглядати їх як СЕТ-операції, керовані інформацією.

Отримані результати свідчать про можливість інтерпретації операцій розширеного матричного криптографічного перетворення як операцій нелінійного перетворення в межах дискретно-казуального підходу. Побудовані моделі дозволяють розглядати їх як реалізацію набору вироджених матричних перетворень, які вибирають залежно від вхідних змінних, що підтверджує несиметричний характер прямих та обернених СЕТ-операцій.

Отже, застосування дискретно-казуального моделювання розширює можливості дослідження елементарних функцій і СЕТ-операцій, забезпечує єдиний формальний апарат їх опису та створює передумови для подальшої уніфікації методів аналізу й синтезу малоресурсних криптографічних перетворень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію критеріїв нелінійності СЕТ-операцій розширеного матричного криптографічного перетворення в межах дискретно-казуального апарату, а також на оцінювання їх криптографічних властивостей із позицій стійкості до відомих криптоаналітичних атак.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Rudnytskyi V., Lada N., Kuchuk G. & Pidlasyi D. Architecture of СЕТ-operations and Stream Encryption Technologies : Monograph. Cherkasy, 2024. 374 p. ISBN 978-966-2554-81. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/monograph/issue/view/22/22> (last accessed: 07.01.2026).
2. Рудницький В. М., Лада Н. В., Рудницька Ю. В., Короткий Т. К. Моделювання симетричних двооперандних операцій криптографічного кодування на основі об'єднання однооперандних операцій // Сучасна спеціальна техніка. 2021. № 4. С. 32–38.
3. Лада Н. В., Рудницька Ю. В. Класифікація груп несиметричних двооперандних операцій криптоперетворення інформації на основі перестановочних схем їх синтезу // Проблеми інформатизації : матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф. : тези доп. (Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Харків, 14–16 листоп. 2018 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2018. С. 11.

4. Лада Н. В., Бреус Р. В., Рудницька Ю. В., Висоцький С. В. Аналіз групи двохоперандних симетричних операцій криптоперетворення // Проблеми інформатизації : матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. : тези доп. (Черкаси – Харків – Баку – Бельсько-Бяла, 13–15 листоп. 2019 р.). Харків : НТУ «ХП», 2019. Т. 1. С. 85.
5. Рудницька Ю. В., Рудницький С. В. Моделювання симетричних операцій криптографічного кодування // Проблеми інформатизації : X Міжнар. наук.-техн. конф. : тези доп. (Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Харків, 24–25 листоп. 2022 р.). Харків : НТУ «ХП», 2022. Т. 2. С. 10.
6. Koblitz N. Algebraic Aspects of Cryptography. Springer-Verlag, Berlin, 1998. 215 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03642-6>
7. Cryptology and Computational Number Theory // Proc. of Symp. in Appl. Math. 1990. 171 p. ISBN 978-0821801550.
8. Хорошко В. А., Чекатков А. А. Методи й засоби захисту інформації. Київ, 2003. 504 с.
9. Юдін О. К., Корченко О. Г., Конахович Г. Ф. Захист інформації в мережах передачі даних : підручник. Київ : ТОВ «НВП» ІНТЕРСЕРВІС», 2009. 716 с.
10. Дмитришин О. В. Методи і засоби блокового шифрування підвищеної стійкості на основі арифметичних операцій за модулем : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Вінниця, 2012. 180 с.
11. Бабенко В. Г. Метод підвищення швидкодії систем захисту інформації на основі використання спеціалізованих логічних функцій : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.21. Черкаси, 2009. 166 с.
12. Чечельницький В. Я. Методологія підвищення ефективності телекомунікаційних систем на основі інтеграції каналного кодування та шифрування даних : дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.02. Одеса, 2013. 407 с.
13. Горбенко Ю. І., Ганзя Р. С. Аналіз шляхів розвитку криптографії після появи квантових комп'ютерів. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/27194/1/8-40-48.pdf> (дата звернення: 20.12.2025).
14. Горбенко Ю. І., Ганзя Р. С. Аналіз стійкості популярних криптосистем проти квантового криптоаналізу на основі алгоритму Гровера // Захист інформації : наук.-практ. журн. Київ, 2014. Т. 16, № 2. С. 106–112. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.16.6915>
15. Bernstein D., Buchmann J., Dahmen E. Post-Quantum Cryptography. Berlin : Springer, 2009. 246 p. ISBN 978-3-540-88701-0. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88702-7>
16. Goldreich O. Foundations of Cryptography. Vol. 1 (Basic tools). Vol. 2 (Basic applications). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2001 (Vol. 1). 372 p. ISBN 978-0-511-54689-1 ; 2004 (Vol. 2). 798 p. ISBN 978-0-521-83084-3. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511721656>
17. Vergili I., Yücel M. D. Avalanche and Bit Independence Properties for the Ensembles of Randomly Chosen S-Boxes. Turk J Elec Engin. 2001. Vol. 9, № 2. P. 137–145.
18. Соколов А. В. Новые методы синтеза нелинейных преобразований современных шифров. Lap Lambert Academic Publishing, Germany, 2015. 100 с.
19. Menezes A. J., Oorschot P. C., Vanstone S. A. Handbook of Applied Cryptography. Pub. CRC Press, 1996. 816 p.
20. Hatzivasilis G., Fysarakis K., Papaefstathiou I., Manifavas Ch. A Review of Lightweight Block Ciphers // J. Cryptographic Engineering. 2018. Vol. 8 (2). P. 141–184. <https://doi.org/10.1007/s13389-017-0160-y>

21. Rogaway Ph., Bellare M., Black J. OCB: A Block-Cipher Mode of Operation for Efficient Authenticated Encryption // ACM Transactions on Information and System Security. 2003. Vol. 6 (3). P. 365–403. <https://doi.org/10.1145/937527.937529>
22. Рудницький В. М., Бабенко В. Г., Жиляєв Д. А. Алгебраїчна структура множини логічних операцій кодування // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : наук.-техн. журн. Харків : ХУПС, 2011. № 2 (6). С. 112–114.
23. Лада Н. В., Козловська С. Г., Рудницький С. В. Побудова математичної групи симетричних операцій на основі додавання за модулем два // Сучасна спеціальна техніка : наук.-практ. журн. Київ, 2019. № 4 (59). С. 33–41. URL: http://suchasnaspetstehnika.com/journal/ukr/2019_4/6.pdf (дата звернення: 20.12.2025).
24. Рудницький В. М., Ларін В. В., Лада Н. В. Дискретно-казуальне моделювання SET-операцій перестановок керованих інформацією : Колективна монографія. Черкаси : ДНДІ ВС ОБТ, 2025. С. 91–134. ISBN 978-617-8725-03-7.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2026.

Прийнято до друку 02.03.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Rudnytskyi, V., Lada, N., Kuchuk, G. & Pidlasyi, D. (2024). Architecture of CET-operations and Stream Encryption Technologies: Monograph. ISBN 978-966-2554-81. Retrived from <https://dndivsovt.com/index.php/monograph/issue/view/22/22>
2. Rudnytskyi, V. M., Lada, N. V., Rudnytska, Yu. V., & Korotkyi, T. K. (2021). Modeliuvannia symetrychnykh dvokhoperandnykh operatsii kryptohrafichnoho koduvannia na osnovi obiednannia odnooperandnykh operatsii [Modeling of Symmetric Two-Operand Operations of Cryptographic Coding Based on the Union of One-Operand Operations]. *Suchasna spetsialna tekhnika [Modern Special Technology]*, 4, 32–38 [in Ukrainian].
3. Lada, N. V., & Rudnytska, Yu. V. (2018). Klasyfikatsiia hrup nesymetrychnykh dvokhoperandnykh operatsii kryptoperetvorennia informatsii na osnovi perestanovochnykh skhem yikh syntezy [Classification of Groups of Asymmetric Two-Operand Operations of Cryptographic Information Conversion Based on Permutation Schemes of Their Synthesis]. In *Problemy informatyzatsii: materialy VI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. [Problems of Informatization: Materials of the VI International Scientific and Technical Conference]*. Cherkasy – Baku – Belsko-Biala – Kharkiv, November 14–16, 2018. (pp. 11). Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian].
4. Lada, N. V., Breus, R. V., Rudnytska, Yu. V., & Vysotskyi, S. V. (2019). Analiz hrupy dvokhoperandnykh symetrychnykh operatsii kryptoperetvorennia [Analysis of the Group of Two-Operand Symmetric Cryptographic Conversion Operations]. In *Problemy informatyzatsii: materialy VII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. [Problems of Informatization: Materials of the VII International Scientific and Technical Conference]*. Cherkasy – Kharkiv – Baku – Belsko-Biala, November 13–15, 2019. (Vol. 1, pp. 85). Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian].

5. Rudnytska, Yu. V., & Rudnytskyi, S. V. (2022). Modeliuvannia symetrychnykh operatsii kryptohrafichnoho koduvannia [Modeling of Symmetric Cryptographic Coding Operations]. In *Problemy informatyzatsii: materialy VII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. [Problems of Informatization: Materials of the X International Scientific and Technical Conference]*. Cherkasy – Baku – Belsko-Biala – Kharkiv, November 24–25, 2022. (Vol. 2, pp. 10). Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian].
6. Koblitz, N. (1998). *Algebraic Aspects of Cryptography*. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03642-6>
7. Cryptology and Computational Number Theory. (1990). *Proc. of Symp. in Appl. Math.* ISBN 978-0821801550.
8. Khoroshko, V. A., & Chekatkov, A. A. (2003). *Metody y zasoby zakhystu informatsii [Methods and Means of Information Protection]*. Kyiv [in Ukrainian].
9. Yudin, O. K., Korchenko, O. H., & Konakhovych, H. F. (2009). *Zakhyst informatsii v merezhakh peredachi danykh: pidruchnyk [Information Protection in Data Transmission Networks: textbook]*. Kyiv [in Ukrainian].
10. Dmytryshyn, O. V. (2012). *Metody i zasoby blokovoho shyfruvannia pidvyshchenoi stiikosti na osnovi aryfmetrychnykh operatsii za modulem: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.05 [Methods and Means of Block Encryption of Increased Stability Based on Arithmetic Operations by Modulus: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.13.05]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
11. Babenko, V. H. (2009). *Metod pidvyshchennia shvydkodii system zakhystu informatsii na osnovi vykorystannia spetsializovanykh lohichnykh funktsii: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.21 [Method of Increasing the Speed of Information Protection Systems Based on the Use of Specialized Logical Functions: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.13.21]*. Cherkasy [in Ukrainian].
12. Chechelnytskyi, V. Ya. (2013). *Metodolohiia pidvyshchennia efektyvnosti telekomunikatsiinykh system na osnovi intehratsii kanalnoho koduvannia ta shyfruvannia danykh : dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.12.02 [Methodology for Increasing the Efficiency of Telecommunication Systems Based on the Integration of Channel Coding and Data Encryption: dissertation ... Dr. Tech. Sciences: 05.12.02]*. Odesa [in Ukrainian].
13. Horbenko, Yu. I., & Hanzia, R. S. (n. d.). *Analiz shliakhiv rozvytku kryptohrafii pislia poiavy kvantovykh kompiuteriv [Analysis of the Development of Cryptography After the Advent of Quantum Computers]*. Retrived from <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/27194/1/8-40-48.pdf> [in Ukrainian].
14. Horbenko, Yu. I., & Hanzia, R. S. (2014). Analiz stiikosti populiarnykh kryptosystem proty kvantovoho kryptoanalizu na osnovi alhorytmu Hrovera [Analysis of the stability of popular cryptosystems against quantum cryptanalysis based on Grover's algorithm]. *Zakhyst informatsii: nauk.-prakt. zhurn. [Information Protection: Scientific and Practical Journal]*, 16, 2, 106–112. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.16.6915> Kyiv [in Ukrainian].
15. Bernstein, D., Buchmann, J., & Dahmen, E. (2009). *Post-Quantum Cryptography*. Berlin. ISBN 978-3-540-88701-0. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88702-7>
16. Goldreich, O. (2004). *Foundations of Cryptography. Vol. 1 (Basic tools). Vol. 2 (Basic applications)*. Cambridge, United Kingdom. ISBN 978-0-511-54689-1; ISBN 978-0-521-83084-3. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511721656>

17. Vergili, I., Yücel, M. D. (2001). Avalanche and Bit Independence Properties for the Ensembles of Randomly Chosen S-Boxes. *Turk J. Elec Engin*, 9, 2, 137–145.
18. Sokolov, A. V. (2015). *Novye metody sinteza nelinejnykh preobrazovanij sovremennykh shifrov [New Methods of Synthesis of Nonlinear Transformations of Modern Ciphers]*. Lap Lambert Academic Publishing, Germany [in Russian].
19. Menezes, A. J., Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A. (1996). *Handbook of Applied Cryptography*.
20. Hatzivasilis, G., Fysarakis, K., Papaefstathiou, I., & Manifavas, Ch. (2018). A Review of Lightweight Block Ciphers. *J. Cryptographic Engineering*, 8 (2), 141–184. <https://doi.org/10.1007/s13389-017-0160-y>
21. Rogaway, Ph., Bellare, M., Black, J. (2003). OCB: A Block-Cipher Mode of Operation for Efficient Authenticated Encryption. *ACM Transactions on Information and System Security*, 6 (3), 365–403. <https://doi.org/10.1145/937527.937529>
22. Rudnytskyi, V. M., Babenko, V. H., & Zhylyaiiev, D. A. (2011). Alhebraichna struktura mnozhyny lohichnykh operatsii koduvannia [Algebraic Structure of the Set of Logical Coding Operations]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy : nauk.-tekhn. zhurn. [Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine: scientific and technical journal]*, 2 (6), 112–114. Kharkiv [in Ukrainian].
23. Lada, N. V., Kozlovska, S. H., & Rudnytskyi, S. V. (2019). Pobudova matematychnoi hrupy symetrychnykh operatsii na osnovi dodavannia za modulem dva [Construction of a Mathematical Group of Symmetric Operations BASED on Addition Modulo Two]. *Suchasna spetsialna tekhnika : nauk.-prakt. zhurn. [Modern Special Technique: scientific and practical journal]*, 4 (59), 33–41. Retrived from http://suchasnaspetstehnika.com/journal/ukr/2019_4/6.pdf Kyiv [in Ukrainian].
24. Rudnytskyi, V. M., Larin, V. V., & Lada, N. V. (2025). Dyskretno-kazualne modeliuvannia SET-operatsii perestannovok kerovanykh informatsiieiu: Kolektyvna monohrafiia [Discrete-Casual Modeling of SET-Operations of Information-Driven Permutations: Collective monograph]. ISBN 978-617-8725-03-7. Cherkasy [in Ukrainian].

V. M. Rudnytskyi, V. V. Larin, S. A. Trystan, P. M. Piontkivskyi

CONSTRUCTION AND RESEARCH OF ADVANCED MATRIX CRYPTOCONVERSION OPERATIONS BASED ON DISCRETE-CASUAL LOGIC

This article examines the possibility of constructing models of CET-operations for an extended matrix cryptographic transformation. The correspondence between direct and inverse operations is verified based on the relationships between them.

A study of extended matrix cryptographic transformation operations was conducted using discrete-causal logic. Sets of two-operand three-bit CET-operations of cryptographic transformation were constructed by combining one-operand two-bit CET-operations.

It has been found that discrete-causal modeling belongs to a modeling framework that allows for the description of all elementary functions and CET-operations used to construct stream encryption cryptographic systems.

Models have been developed that confirm the hypothesis that CET-operations of the extended matrix cryptographic transformation can be regarded as nonlinear transformation operations. It has been established that the obtained discrete-causal model of an extended matrix cryptographic transformation implements four degenerate matrices, which are selected depending on the values of the input variables.

It has been proven that the CET-operations of the extended matrix cryptographic transformation are information-driven. It is emphasized that the application of discrete-causal modeling allows for a uniform description of all elementary functions upon which CET-operations are based. Furthermore, it has been established that discrete-causal modeling allows for expanding the scope of research into elementary functions and CET-operations.

The results of this study can be applied to mobile and stationary systems for resource-constrained cryptographic protection of confidential information, encryption systems, cryptographic protocols, and so on.

Keywords: *discrete-causal model; stream encryption; CET-encryption; CET-operations; two-operand three-bit operations; one-operand operations.*

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.03

УДК 621.396

В. С. Ахтирцева, Ph. D.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-0624-2284>

О. В. Франжі

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0007-8828-5264>

В. П. Фриз, канд. техн. наук, доц.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0009-3267-5073>

МОДЕРНІЗАЦІЯ FM-ПЕРЕДАВАЧА RIAB ЗА РАХУНОК РОЗРОБКИ СПРЯМОВАНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ АНТЕНИ

У статті розглянуто питання підвищення ефективності психологічних операцій у сучасній російсько-українській війні шляхом модернізації тактичного FM-передавача типу RIAB за рахунок застосування спрямованої передавальної антенної системи. Показано, що використання штатної антени з круговою діаграмою спрямованості обмежує можливості таргетованого радіомовлення та призводить до нераціонального розподілу енергії випромінювання, що є критичним фактором під час ведення психологічних операцій.

На основі аналізу сучасних наукових публікацій і наявних технічних рішень обґрунтовано доцільність модернізації RIAB за рахунок застосування спрямованої антени FM-діапазону з шириною діаграми спрямованості близько 35°. Запропоновано конструкцію спрямованої антени у вигляді системи з двох двоелементних дипольних антен, фазовано об'єднаних на спільній траверсі. Виконано аналітичний розрахунок основних геометричних та електричних параметрів антени для середньої частоти 100 МГц, а також проведено комп'ютерне моделювання в середовищі MMANA-GAL з урахуванням впливу конструктивних елементів і металевої щогли.

Наведено результати експериментальних вимірювань із використанням аналізатора антен і фідерних ліній RigExpert, які підтвердили резонансний режим роботи антени, високий рівень узгодження з фідером та практично нульову реактивну складову вхідного опору. Описано результати випробувань у бойових умовах, які підтверджують забезпечення стійкого радіоприймання на відстані до 35–40 км за потужності передавача 600 Вт.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування розробленої спрямованої антенної системи для модернізації FM-передавачів RIAB з метою збільшення дальності впевненого приймання та підвищення ефективності таргетованого психологічного впливу.

© В. С. Ахтирцева, О. В. Франжі, В. П. Фриз, 2026

Ключові слова: психологічна операція; FM-радіомовлення; тактичний передавач RIAB; спрямована передавальна антена; УКХ-діапазон; параметри антени; ширина діаграми спрямованості; хвильовий опір; коефіцієнт стоячої хвилі; коефіцієнт підсилення; антенно-фідерний тракт.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасній російсько-українській війні досягнення успіху на полі бою визначається не лише ефективністю вогневого ураження противника, але й здатністю впливати на поведінку його особового складу. Психологічні операції (ПсО) стали невід'ємною складовою комплексного застосування сил і засобів, спрямованих на зниження боєздатності, деморалізацію особового складу противника та руйнування його мотивації до продовження збройної боротьби.

Особливістю нинішнього етапу війни є поєднання цифрових каналів впливу на цільову аудиторію (соціальних мереж, месенджерів) із класичними засобами комунікації (листівками, радіомовленням), яке зберігає високу ефективність, особливо в умовах обмеженого доступу до інтернету [1].

Умови ведення психологічних операцій потребують мобільних засобів радіомовлення, здатних забезпечувати оперативне та таргетоване поширення інформації на визначені цільові аудиторії. Одним із ключових засобів у підрозділах ПсО є тактичні мобільні FM-передавачі типу RIAB (Radio in a Box), що дозволяють швидко розгортати радіомовлення в польових умовах для впливу на противника [2].

Штатна антена RIAB має кругову діаграму спрямованості, що не дає змоги здійснювати радіомовлення у визначеному напрямку та призводить до небажаного кругового поширення сигналу. Це обмежує можливості впливати на визначену цільову аудиторію, а саме на особовий склад противника, який знаходиться на лінії бойового зіткнення (ЛБЗ) або за нею. Тому підрозділам ПсО необхідно мати змогу здійснювати радіомовлення у визначеному напрямку. До того ж антену необхідно встановлювати на віддалі понад 20–25 км від ЛБЗ для зменшення на неї впливу засобів вогневого ураження противника, при цьому дальність радіомовлення має значно перекивати цю відстань. Досягнути такої можливості можна за рахунок використання спрямованої антени, це дозволить зменшити небажане поширення сигналу в інші напрямки та збільшить дальність впевненого радіоприймання.

Отже, модернізація RIAB за рахунок використання для нього спрямованої антенної системи є актуальним завданням, що має важливе практичне значення для підвищення ефективності ПсО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [3–6] розглянуто наявні на ринку зразки спрямованих передавальних антен FM-діапазону, але вони розраховані на експлуатацію в стаціонарному варіанті, є важкими та громіздкими, що робить не можливим їх застосування у складі мобільного комплексу. Тому в подальшому проаналізуємо підходи для розрахунку та створення спрямованої антени FM-діапазону.

Базові підходи до проектування антен УКХ-діапазону з урахуванням умов реальної експлуатації систематизовано в [7]. Детально розглянуто вплив підстильної поверхні та

висоти встановлення антени на форму діаграми спрямованості, що є важливим для формування просторово обмеженого поля випромінювання.

У роботі [8] наведено методи розрахунку антенних систем різних типів. Особливу увагу приділено питанням узгодження та підвищення енергетичної ефективності антен, що безпосередньо впливає на дальність дії передавальних FM-систем.

У статі [9] розглянуто практичні методи формування вузькоспрямованих діаграм у VHF-діапазоні шляхом оптимізації міжелементних відстаней та фазових зсувів. Отримані результати є релевантними для створення дво- та багатоелементних антен із заданою шириною діаграми спрямованості.

У [10] автор досліджує антенні решітки щодо їх спеціального та військового застосування. Він акцентує увагу на стабільності параметрів випромінювання й надійності конструкції в умовах впливу зовнішніх факторів, що є критично важливим для експлуатації в бойових умовах.

Питання узгодження передавальних антен FM-діапазону та вплив реактивної складової вхідного опору на коефіцієнт стоячої хвилі розглянуто в [11]. Результати дослідження підтверджують доцільність мінімізації реактивного опору для підвищення ефективності передавальних систем.

Антенно-фідерні пристрої радіостанцій спеціального призначення висвітлено у [12]. Автор підкреслює важливість механічної міцності, електричної стабільності та адаптації антен до тривалої експлуатації в складних умовах, зокрема у військових підрозділах.

У [13] детально розглянуто принципи фазування елементів і формування вузьких діаграм спрямованості, що є теоретичною основою для розроблення антен з шириною діаграми спрямованості близько 35°.

Автор у [14] наводить прикладні методики оптимізації геометричних параметрів антен та аналізує вплив конструктивних рішень на форму діаграми спрямованості у VHF-діапазоні, що безпосередньо корелює з предметом дослідження.

Аналіз вітчизняних і закордонних публікацій свідчить про наявність теоретичних і прикладних напрацювань у галузі формування вузькоспрямованих антен УКХ-діапазону, однак у них не досліджено питання їх адаптації до спеціального та бойового застосування.

Формулювання завдання дослідження. Метою статі є вибір конструкції, розрахунок та моделювання параметрів спрямованої антени для модернізації тактичного FM-передавача RIAB.

Виклад основного матеріалу. Одним із ключових технічних засобів психологічного впливу в тактичній ланці є мобільна радіостанція FM-діапазону RIAB, яка забезпечує оперативне розгортання радіомовлення безпосередньо в зоні бойових дій [2].

Основні тактико-технічні характеристики RIAB:

діапазон частот – 87,5–108 МГц;

тип антени – прямий півхвильовий диполь;

хвильовий опір – 50 Ом;

коефіцієнт підсилення – 5,5 дБ;

коефіцієнт стоячої хвилі – 1:1;

поляризація – вертикальна або горизонтальна (залежно від орієнтації);

потужність передавача – 1000 Вт;

вага – 80 кг.

У комплектації RIAB не передбачено спрямованої антени, тому питання її розроблення є ключовим у модернізації комплексу.

Процес розроблення антени складається з декількох взаємопов'язаних етапів: визначення вимог, аналізу можливих варіантів конструкції, розрахунку параметрів, програмного моделювання, вибору матеріалів та виготовлення прототипу, експериментальних вимірювань та випробування. Кожен із них має суттєве значення для забезпечення відповідності результату висунутим вимогам.

Початковим етапом стало визначення вимог до технічних характеристик, яким має відповідати антена:

робочий діапазон частот – 87,5–108 МГц;

ширина діаграми спрямованості в межах 30°–40°;

коефіцієнт підсилення – 5–8 дБ відносно диполя (оптимальний баланс між енергетичною ефективністю та мобільністю конструкції);

коефіцієнт стоячої хвилі – не більше 1,5 у всьому робочому діапазоні (для зменшення зворотних відбиттів та втрат у фідері);

антена повинна витримувати роботу з потужністю передавача RIAB 1000 Вт;

хвильовий опір антени повинен бути 50 Ом для узгодженості зі штатними фідерними системами RIAB.

Також було встановлено низку експлуатаційних обмежень, які значною мірою вплинули на вибір конструкції. Щодо мобільності, то антена має розгортатися й згортатися силами одного-двох військовослужбовців без застосування спеціальних інструментів. Крім того, вона не повинна перевантажувати особовий склад під час її перенесення та розгортання (згортання). Її масу має витримувати щогла або вежа, на якій її буде встановлено. Конструкція антени повинна бути стійкою до вітрових навантажень, вологості та температурних коливань. Важливою також є простота розгортання та налаштування. Особовий склад має швидко виконувати монтаж без спеціального обладнання.

На початковому етапі розроблення було розглянуто кілька варіантів антен FM-діапазону.

Директорна антена типу “хвильовий канал” (3–5 елементів) має високе підсилення, але значну довжину (до 3,5 м) та вузький діапазон, що є неприйнятним.

Логоперіодична антена забезпечує широкий діапазон частот, проте має нижчий коефіцієнт посилення та потенційно більший розмір.

Антену типу “подвійний квадрат” має високе підсилення, широкий діапазон частот, але в неї велика вітрильність і громіздкість, складна конструкція та монтаж.

У результаті аналізу [7–14] та згаданих вище варіантів встановлено, що прийнятним рішенням є система з двох двохелементних антен дипольного типу, зібраних на спільній траверсі та фазовано з'єднаних для формування потрібної діаграми спрямованості. Два дипольні елементи забезпечують компактність, а фазування – високу спрямованість без надмірного збільшення довжини конструкції.

Розрахуємо параметри антени [9].

1. Визначимо довжину хвилі антени λ для середнього значення FM-діапазону 100 МГц за формулою

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

де $c \approx 3 \cdot 10^8$ (м/с), $\lambda = 3$ (м).

2. Поведемо розрахунок електричної довжини $L_{\text{ел}}$ для активного півхвильового диполя за виразом

$$L_{\text{ел}} = \frac{\lambda}{2} = 1,5 \text{ (м)}.$$

3. Обчислимо фізичну довжину $L_{\text{актив}}$ диполя з урахуванням укорочення за формулою

$$L_{\text{актив}} = (0,47 \dots 0,49) \cdot \lambda = 0,72 \text{ (м)}.$$

4. Довжину рефлектора $L_{\text{реф}}$ знайдемо за формулою

$$L_{\text{реф}} = (1,03 \dots 1,05) \cdot L_{\text{актив}} = 0,75 \text{ (м)}.$$

5. Відстані d між елементами обчислюємо за формулою

$$d = (0,1 \dots 0,25) \cdot \lambda = 0,3 \text{ (м)}.$$

6. Розраховуючи вхідний опір антени $R_{\text{вх}}$, слід врахувати, що конструктивно зроблено так, що опір одного диполя становить $R_{\text{вх}} = 100$ Ом, оскільки диполі з'єднані паралельно, а саме

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 50 \text{ (Ом)}.$$

Наступним етапом стало моделювання антени в програмному середовищі MMANA-GAL, що дозволило більш точно визначити та підібрати параметри її конструкції. Результати моделювання наведено на рис. 1–2.

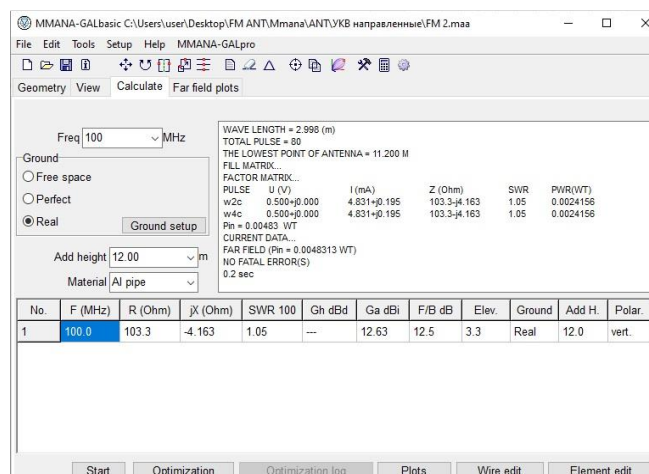


Рис. 1. Результати моделювання параметрів антени

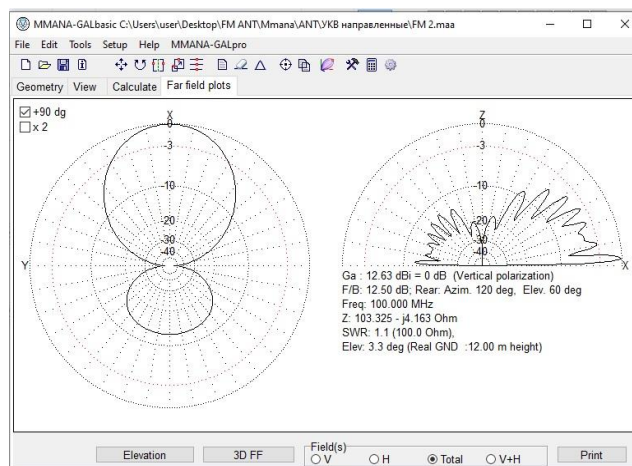


Рис. 2. Результати моделювання діаграми спрямованості антени

У процесі моделювання виконано:

визначення оптимальних довжин диполів у робочому діапазоні частот із урахуванням коефіцієнта укорочення;

розрахунок відстаней між елементами антени для формування потрібного фазового зсуву;

підбір оптимальної відстані між диполями антени (визначає ширину діаграми спрямованості);

розрахунок та моделювання діаграми спрямованості в горизонтальній та вертикальній площинах (рис. 2);

розрахунок впливу щогли, кабелю та траверси на параметри антени.

Серія моделювань дала змогу вибрати оптимальне співвідношення між коефіцієнтом підсилення та шириною діаграми спрямованості. Зокрема, у разі невеликого збільшення фазової відстані між диполями досягалася більша дальність випромінювання, але втрачалася стабільність діаграми. На користь конструкції з двох диполів зі скороченою фазовою відстанню (понад $0,2\lambda$) свідчили результати моделювання, що забезпечували ширину діаграми спрямованості близько 30° за коефіцієнта підсилення 6,8–7,3 дБ.

Важливо, що під час розроблення було враховано вплив металевої щогли, який може призвести до зміщення резонансної частоти антени. Завдяки моделюванню цей ефект компенсовано коректуванням довжини елементів.

Після уточнення параметрів антени розроблено конструкцію з урахуванням практичних аспектів експлуатації рис. 3.

Для виготовлення активних диполів та рефлекторів як матеріал обрано алюмінієву трубку $\varnothing 20$ мм, оскільки вона має малу масу, високу жорсткість та корозійну стійкість.

Траверса зроблена з дюралюмінієвого профілю $20 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}$.

Слід зауважити, що для симетрування та узгодження хвильового опору антени з опором фідера застосовано пристрій – чвертьхвильову склянку, зроблену з відрізків коаксіального кабелю довжиною $0,25\lambda$, прокладеного всередині профілю. У такий спосіб вдалося отримати хвильовий опір антени в 50 Ом, що відповідає характеристикам фідера FM-передавача RIAB.

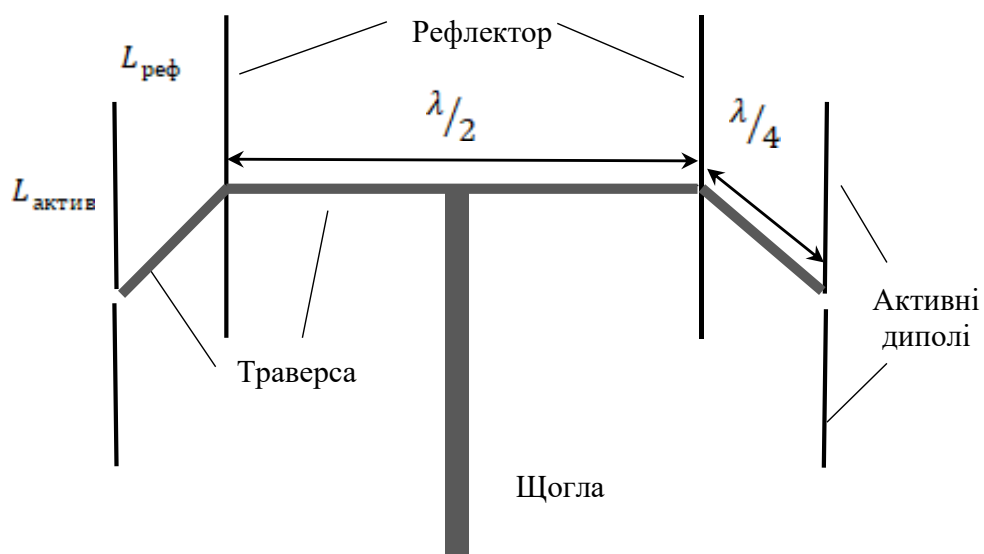


Рис. 3. Конструкція антени

За результатами розрахунків та моделювання було створено дослідний зразок антени, який пройшов низку вимірювань та випробувань (рис. 4).



Рис. 4. Дослідний зразок антени

Серія вимірювань, виконаних із застосуванням аналізатора антен і фідерних ліній RigExpert, показала, що коефіцієнт стоячої хвилі на робочій частоті становить 1,4:1, а реактивна складова вхідного опору антени є практично нульовою. Отримані значення свідчать про резонансний режим роботи антени та високий рівень узгодження антенно-

фідерного тракту з вихідним опором передавача, що забезпечує мінімальні відбиття електромагнітної енергії, ефективне передавання активної потужності та стабільну роботу FM-передавача в заданому частотному діапазоні.

За результатами експериментальних вимірювань та експлуатаційних випробувань встановлено, що дослідний зразок антени має такі основні тактико-технічні параметри:

- діапазон робочих частот – 87,5–108 МГц;
- хвильовий опір – 50 Ом;
- конектор типу – 7/16;
- максимальна потужність – 1000 Вт;
- коефіцієнт стоячої хвилі – не більше 1,4:1;
- поляризація – вертикальна;
- коефіцієнт підсилення – до 7,5 дБ (відносно диполя);
- ширина діаграми спрямованості в *E* пл. +/-35°, в *H* пл. +/-30°;
- розміри – 1500 мм, 1600 мм, 760 мм;
- вага – до 5 кг.

Отже, розроблена антена відповідає висунутим вимогам до її технічних характеристик.

Слід зазначити, що дослідний зразок антени пройшов апробацію в бойових умовах в одному з підрозділів ПсО. Антену було встановлено на щоглі висотою 100 м, вона працювала з передавачем потужністю 600 Вт. За результатами експлуатаційних випробувань зафіксовано стійке та впевнене радіоприймання сигналу на відстані 35–40 км, що підтверджує високу практичну ефективність розробленої антенної системи в умовах реального застосування.

Висновки. У ході проведеного дослідження було обґрунтовано актуальність модернізації мобільних FM-передавачів типу RIAB за рахунок застосування спрямованих антенних систем для підвищення ефективності радіомовлення під час проведення ПсО в сучасних умовах російсько-української війни.

На основі аналізу наявних конструкцій антен FM-діапазону та з урахуванням експлуатаційних обмежень підрозділів ПсО розроблено конструкцію спрямованої антени у вигляді системи з двох двохелементних дипольних антен, фазовано об'єднаних на спільній траверсі. Запропоноване рішення забезпечує оптимальне співвідношення між коефіцієнтом підсилення, шириною діаграми спрямованості, мобільністю та механічною надійністю конструкції.

Результати експериментальних вимірювань підтвердили відповідність основних електричних параметрів антени розрахунковим і даним моделювання: коефіцієнт стоячої хвилі не перевищує 1,4:1 у робочому діапазоні частот, а реактивна складова вхідного опору є близькою до нуля, що свідчить про резонансний режим роботи та ефективне передавання потужності.

Експлуатаційні випробування, проведені в бойових умовах у підрозділі ПсО, продемонстрували високу практичну ефективність розробленої антенної системи, що підтверджує доцільність її застосування для таргетованого впливу на особовий склад противника.

Отже, розроблена спрямована антена може бути рекомендована для впровадження до складу мобільних комплексів FM-радіомовлення типу R1AB з метою збільшення дальності впевненого приймання та підвищення ефективності таргетованого психологічного впливу на особовий склад противника.

У подальшому запропоновану конструкцію антени можливо адаптувати до використання з більшою потужністю передавача.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Збірник узагальнення бойового досвіду підрозділів ССО під час Курської операції (3 серпня – 6 вересня 2024 року) / Командування ССО. 2024. 182 с.
2. СпТКП 7-164(18).56 Інструкція застосування технічних засобів озброєння груп спеціальних дій / Командування ССО. 2025. 33 с.
3. Vitex Antenna-Fider Equipment. URL: <https://www.vitex.kiev.ua/ukr/company> (last accessed: 27.01.2026).
4. ANTENNA-MARKET. URL: https://antenna-arket.com/ua/about_us (last accessed: 17.01.2026).
5. Navis-Ukraine Antennas. URL: <https://nvs-ts.com.ua/en/products/antennas.html> (last accessed: 27.01.2026).
6. EuroCaster AKY/3M FM Wide Band Yagi Antenna. URL: <https://eurocaster.eu/shop/294-fm-antennas-directional/10439-eurocaster-aky3m-fm-wide-band-yagi-antenna-stainless-steel-2kw/> (last accessed: 07.02.2026).
7. Глухов В. В., Литвиненко О. Є. Антени та поширення радіохвиль : навч. посіб. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2018. 256 с.
8. Козловський В. І., Сидоренко В. М. Радіотехнічні системи та антени : підручник. Харків : ХНУРЕ, 2016. 384 с.
9. Підгорний А. М., Шевченко О. В. Проектування антен УКХ-діапазону для систем радіомовлення // Вісник Нац. техніч. ун-ту України «КПІ». Серія : Радіотехніка. 2019. № 3. С. 45–52.
10. Бондаренко Ю. В. Формування діаграм спрямованості антенних решіток у VHF-діапазоні // 36. наук. праць Військ. ін-ту телекомунікацій та інформатизації. Київ, 2020. № 2. С. 61–68.
11. Кравченко С. О., Мельник І. П. Аналіз параметрів узгодження передавальних антен FM-діапазону // Наукові записки Українського наук.-дослід. ін-ту зв'язку. 2021. № 1. С. 33–40.
12. Шевченко В. П. Антенно-фідерні пристрої радіостанцій : навч. посіб. Львів : ЛНУ «Львівська політехніка», 2015. 292 с.
13. Hansen R. C. Phased Array Antennas. Hoboken : Wiley, 2009. 560 p.
14. Milligan T. A. Modern Antenna Design. 2nd ed. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2005. 512 p.

Стаття надійшла до редакції 16.02.2026.

Прийнято до друку 10.03.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Zbirnyk uzahalnennia boiovoho dosvidu pidrozdiliv SSO pid chas Kurskoi operatsii [Collection of Generalizations of Combat Experience of Special Operations Forces Units During the Kursk Operation] (03.08.2026 – 06.09.2024). [in Ukrainian].
2. SpTKP 7-164(18).56. Instruksiiia zastosuvannia tekhnichnykh zasobiv ozbroiennia hrup spetsialnykh dii [Instructions for the Use of Technical Means of Armament of Special Operations Groups]. (2025). [in Ukrainian].
3. Vitex Antenna-Fider Equipment. (n. d.). Retrived from <https://www.vitex.kiev.ua/ukr/company>
4. ANTENNA-MARKET. (n. d.). Retrived from https://antenna-arket.com/ua/about_us
5. Navis-Ukraine Antennas. (n. d.). Retrived from <https://nvs-ts.com.ua/en/products/antennas.html>
6. EuroCaster AKY/3M FM Wide Band Yagi Antenna. (n. d.). Retrived from <https://eurocaster.eu/shop/294-fm-antennas-directional/10439-eurocaster-aky3m-fm-wide-band-yagi-antenna-stainless-steel-2kw/>
7. Hlukhov, V. V., & Lytvynenko, O. Ye. (2018). *Anteny ta poshyrennia radiokhvyl: navch. posib [Antennas and Propagation of Radio Waves: textbook]*. Kyiv [in Ukrainian].
8. Kozlovskiy, V. I., & Sydorenko, V. M. (2016). *Radiotekhnichni systemy ta anteny: pidruchnyk [Radio Engineering Systems and Antennas: textbook]*. Kharkiv [in Ukrainian].
9. Pidhornyi, A. M., & Shevchenko, O. V. (2019). Proiektuvannia anten UKKh-diapazonu dlia system radiomovlennia [Design of VHF Antennas for Radio Broadcasting Systems]. *Visnyk Nats. tekhnich. un-tu Ukrainy «KPI». Seriya: Radiotekhnika. [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Radio Engineering]*, 3, 45–52 [in Ukrainian].
10. Bondarenko, Yu. V. (2020). Formuvannia diahram spriamovanosti antenykh reshitok u VHF-diapazoni [Formation of directivity diagrams of antenna arrays in the VHF range]. *Zb. nauk. prats Viisk. in-tu telekomunikatsii ta informatyzatsii [Collection of Scientific Works of the Military. Institute of Telecommunications and Informatization]*, 2, 61–68. Kyiv [in Ukrainian].
11. Kravchenko, S. O., & Melnyk, I. P. (2021). Analiz parametriv uzghodzhennia peredavalnykh anten FM-diapazonu [Analysis of the Parameters of Matching Transmitting Antennas of the FM Range]. *Naukovi zapysky Ukrainskoho nauk.-doslid. in-tu zviazku [Scientific Notes of the Ukrainian Scientific Research Institute of Communications]*, 1, 33–40 [in Ukrainian].
12. Shevchenko, V. P. (2015). *Antenno-fiderni prystroi radiostantsii: navch. posib. [Antenna-Feeder Devices of Radio Stations: a teaching manual]*. Lviv [in Ukrainian].
13. Hansen, R. C. (2009). *Phased Array Antennas*. Hoboken: Wiley-Press. <https://doi.org/10.1002/9780470529188>
14. Milligan, T. A. (2005). *Modern Antenna Design*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Press. <https://doi.org/10.1002/0471720615>

V. S. Ahtyrceva, O. V. Frangy, V. P. Fryz

MODERNIZATION OF THE RIAB FM TRANSMITTER BY DEVELOPING A DIRECTIONAL TRANSMISSION ANTENNA

The article discusses the issue of improving the effectiveness of psychological operations in the current Russian-Ukrainian war by modernizing the tactical FM transmitters of the RIAB type through the use of a directional transmission antenna system. It is shown that the use of

a standard antenna with a circular directivity pattern limits the capabilities of targeted radio broadcasting and leads to an irrational distribution of radiation energy, which is a critical factor in conducting psychological operations.

Based on an analysis of current scientific publications and existing technical solutions, the feasibility of modernizing RIAB by using a directional FM band antenna with a directivity pattern width of about 30–40° is justified. A directional antenna design is proposed in the form of a system of two two-element dipole antennas, phased together on a common crossbar. An analytical calculation of the main geometric and electrical parameters of the antenna for an average frequency of 100 MHz was performed, and computer modeling was carried out in the MMANA-GAL environment, taking into account the influence of structural elements and the metal mast.

The results of experimental measurements using the RigExpert antenna and feeder line analyzer are presented, which confirmed the resonant mode of operation of the antenna, a high level of matching with the feeder, and a practically zero reactive component of the input impedance. The results of tests in combat conditions are described, which confirm stable radio reception at a distance of up to 35–40 km with a transmitter power of 600 W.

The results confirm the feasibility of using the developed directional antenna system to upgrade RIAB FM transmitters in order to increase the range of reliable reception and improve the effectiveness of targeted psychological influence.

Keywords: *psychological operation; FM radio broadcasting; RIAB tactical transmitter; directional transmitting antenna; VHF band; antenna parameters; beamwidth; characteristic impedance; standing wave ratio; gain; antenna-feeder path.*

О. А. Нагорнюк, канд. техн. наук
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0000-0002-7680-7201>

МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЗОН РАДІОПОДАВЛЕННЯ ПЕРЕДАВАЧІВ ПЕРЕШКОД ПРИЙМАЧАМ СИГНАЛІВ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Постановка перешкод радіоприймачам апаратури споживачів супутникових радіонавігаційних систем засобів повітряного нападу є одним із ефективних способів боротьби з ними. Для зменшення впливу радіоперешкод у системах супутникової радіонавігації противник використовує малогабаритні адаптивні антенні решітки, побудовані за технологією Controlled Reception Pattern Antenna, кількість елементів у яких постійно збільшується. Подавлення приймальної апаратури, обладнаної перешкодостійкими антенними решітками, потребує одночасного застосування сукупності просторово рознесених засобів радіоелектронної боротьби. Планування розміщення таких засобів, а також формування вимог до них передбачає використання математичного та методичного забезпечення розрахунку характеристик і параметрів їх зон радіоподавлення. У статті розроблено математичний апарат моделювання процесу радіоподавлення навігаційних радіоприймачів, який ґрунтується на аналітичних виразах, що описують розповсюдження радіосигналів у вільному просторі та в атмосфері. Запропоновано дві методики розрахунку зон радіоподавлення засобів радіоелектронної боротьби із неспрямованими та спрямованими антенами, а також їх проєкцій на земну поверхню. В обчисленнях враховано технічні параметри радіонавігаційної апаратури, передавачів радіоперешкод, форми їх діаграм спрямованості, а також втрати на розповсюдження в атмосфері. У програмному середовищі MATLAB створено програмне забезпечення розрахунку і відображення зон радіоподавлення передавачів перешкод у просторі та на поверхні. Наведено три приклади обчислення зон дії засобів радіоподавлення із неспрямованою, слабоспрямованою та спрямованою антенами. Показано, що зони радіоподавлення засобів радіоелектронної боротьби на земній поверхні за певних умов можна із достатньою точністю апроксимувати кругом або його сектором.

Ключові слова: методика; радіоподавлення; супутникова радіонавігація; зона радіоподавлення; передавач перешкод; засіб повітряного нападу.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У системах навігації та наведення переважної більшості засобів повітряного нападу (ЗПН) використовується інформація з апаратури споживачів (АС) супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), яка є основним джерелом навігаційної інформації або частиною більш складної навігаційної

системи, що може включати інші підсистеми забезпечення польоту ЗПН та його наведення на ціль (інерціальна навігаційна система, TERCOM (Terrain Contour Matching), DSMAC (Digital Scene Matching Area Correlation) тощо) [1]. Подавлення приймачів радіосигналів СРНС ЗПН призводить до відхилення ЗПН від запрограмованого маршруту польоту, унеможливлення виходу в заданий район для пошуку й захоплення цілі та підвищення ймовірності ураження ЗПН засобами протиповітряної оборони [2, 3]. Для зменшення впливу радіоперешкод в АС СРНС використовують перешкодостійкі малогабаритні адаптивні антенні решітки (МААР), побудовані за технологією CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna), що здійснюють просторову режекцію радіоперешкод [4–6]. Ефективним способом протидії АС СРНС із МААР є одночасне використання сукупності просторово рознесених передавачів перешкод (ПП), кількість яких повинна бути не меншою ніж кількість антенних елементів МААР.

Планування застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) для прикриття визначених об'єктів з урахуванням заданої кратності перекриття зон їх дії, а також формування вимог до них потребують наявного математичного та методичного апаратів для визначення характеристик і параметрів зон радіодавлення (РП). Тому розроблення методик розрахунку зон РП ПП навігаційним приймачам є актуальним науково-практичним завданням.

За визначенням, зоною подавлення є ділянка простору (або її проєкція на земну поверхню), у межах якої технікою (засобами) РЕБ забезпечується подавлення цілей з ефективністю, не меншою від заданої [7]. У цій роботі для розділення понять тривимірної та двовимірної зон РП використовуємо такі назви: зона РП у просторі й зона РП на поверхні. Остання є проєкцією на земну поверхню зони РП у просторі для заданої висоти польоту безпілотної літальної апарата (БПЛА).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [8] на основі останніх рецензованих досліджень проведено комплексний аналіз захищеності навігаційних систем БПЛА для виявлення та усунення прогалин у сучасних дослідженнях. У ньому, зокрема, розглядається перешкодостійкість АС СРНС БПЛА, потенційні рішення щодо її підвищення та перспективні напрямки подальших досліджень.

Аналіз відомих способів РП та спуфінгу АС СРНС проведено у [9], оцінено їх ефективність з урахуванням можливих способів розміщення ПП, визначено тенденції подальшого розвитку технологій подавлення супутникової навігації.

У статті [10] досліджено похибки визначення координат навігаційним приймачем в умовах РП. Наведено результати експериментальних досліджень та їх порівняння з теоретичними розрахунками.

В [11] отримано математичні вирази для визначення ступеня впливу таких різних видів радіоперешкод на роботу приймача GPS (Global Positioning System): безперервне коливання; вузькосмугова; широкосмугова; узгоджена за спектром; імпульсна. Визначено середній час до втрати синхронізації в разі впливу вказаних радіоперешкод на GPS-приймач. Аналітичні вирази перевірені за допомогою комп'ютерного моделювання.

Можливості засобів РЕБ щодо РП телекомунікаційних систем різними видами радіоперешкод розглянуто у [12]. Наведено формули для оцінювання впливу перешкод на приймач радіоканалу, що ґрунтуються на аналізі втрат під час розповсюдження

радіохвиль у вільному просторі. Із технічних параметрів ПП і радіоканалу враховано лише їх ефективну випромінювану потужність.

У [13] запропоновано математичні вирази для розрахунку дальності РП навігаційних приймачів, що ґрунтуються на рівнянні передачі Фріїса. Запропоновано два підходи до тестування приймачів сигналів СРНС та проведено експериментальні дослідження ефективності РП різними видами радіоперешкод.

Отже, у наявних публікаціях переважно розглянуто вплив різних видів радіоперешкод на ефективність РП АС СРНС, наведено математичні вирази обчислення дальності дії ПП, що мають низку обмежень та допущень. Для визначення дальності РП не враховано характеристик діаграми спрямованості (ДС) антени, її поляризації та висоту розміщення, а також поглинання радіохвиль в атмосфері. Відсутні математичний та методичний апарати для визначення зон РП ПП приймачам АС СРНС.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення методик розрахунку зон РП ПП приймачам АС СРНС.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 схематично зображено положення ПП, ЗПН та навігаційних супутників у топоцентричній системі координат [14], із центром у точці розміщення ПП ($x_j = 0, y_j = 0, z_j = 0$).

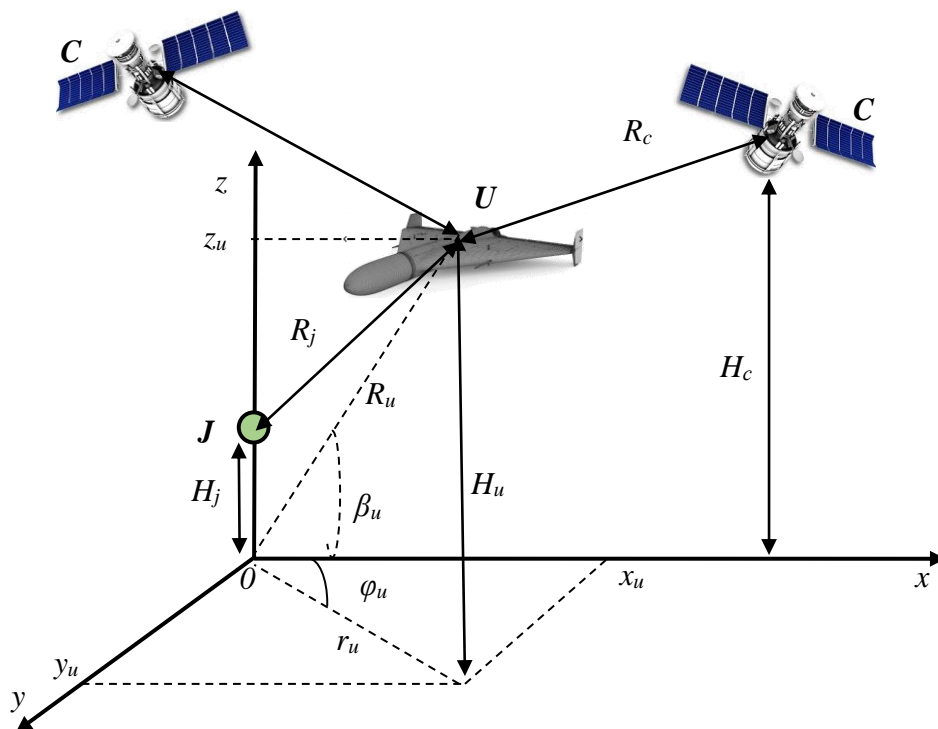


Рис. 1. Графічне зображення просторового положення ПП, ЗПН та навігаційних супутників

На рис. 1 прийнято такі позначення: J – ПП; U – ЗПН; C – супутник навігаційний; H_j – висота підняття антени ПП; H_u – висота польоту ЗПН; H_c – висота орбіти супутника; x_u, y_u, z_u – координати ЗПН у декартовій системі координат; φ_u, β_u, R_u – координати ЗПН у сферичній системі координат; φ_u, r_u – координати проєкції місцеположення ЗПН

на земну поверхню (площину xu) у полярній системі координат; R_j, R_c – похилі дальності від антени АС СРНС ЗПН до антен ПП та супутника.

Потужність радіосигналу P_{uc} та радіоперешкоди P_{uj} на вході навігаційного приймача ЗПН можна розрахувати за аналітичними виразами, що враховують втрати на розповсюдження у вільному просторі та затухання в атмосфері [15, 16]:

$$P_{uc} = \sqrt{\frac{P_c G_{cu} G_{uc} \gamma_c \lambda^2 L_c}{(4\pi)^2 R_c^2 B_c}}, \quad P_{uj} = \sqrt{\frac{P_j G_{ju} G_{uj} \gamma_j \lambda^2 L_j}{(4\pi)^2 R_j^2 B_j}}, \quad (1)$$

де P_j, P_c – потужності передавачів ПП та навігаційного супутника;

B_j, B_c – ширина амплітудно-частотного спектра радіоперешкоди та радіосигналу;

G_{ju} – коефіцієнт підсилення (КП) антени ПП у напрямку ЗПН;

G_{uj} – КП антени ЗПН в напрямку ПП;

G_{cu} – КП антени супутника в напрямку ЗПН;

G_{uc} – КП навігаційної антени ЗПН у напрямку супутника;

γ_j, γ_c – коефіцієнти, що враховують втрати в разі незбігу поляризацій антен ПП та супутника із поляризацією навігаційної антени АС СРНС ЗПН [14];

λ – довжина радіохвилі, що відповідає робочому діапазону частот СРНС;

L_j, L_c – коефіцієнти, що враховують втрати радіосигналу в ході його поширення в атмосфері.

Умовою РП приймача АС СРНС є створення на його вході радіоперешкоди із потужністю, що перевищує потужність навігаційного радіосигналу в K_p разів ($P_{uj} \geq K_p P_{uc}$), де K_p – коефіцієнт подавлення [17].

Врахувавши K_p , із (1) можна отримати рівняння, що описує межу зони РП ПП:

$$R_j^2 = K_a R_c^2; \quad K_a = \frac{P_j G_{ju} G_{uj} \gamma_j B_c L_j}{P_c G_{cu} G_{uc} \gamma_c B_j L_c K_p}, \quad (2)$$

де K_a – коефіцієнт, що враховує технічні параметри приймально-передавальної апаратури ПП, ЗПН та навігаційного супутника.

Отримаємо розв’язки рівняння (2) для розрахунку зон РП ПП із неспрямованою та спрямованою антенами.

Вихідні дані для ПП із неспрямованою антеною

Для цього випадку прийнято таке припущення. Коефіцієнти G_{ju}, G_{cu} є постійними та дорівнюють КП антен ПП та навігаційного супутника. Воно також є справедливим під час розрахунку зон РП ПП, антени яких мають ДС купольного типу (ширина ДС – 360° за азимутом, 180° за кутом місця). У такому разі можна прийняти $G_{ju} = G_j$, де G_j – КП антени ПП, та $G_{cu} = G_c$, де G_c – КП антени навігаційного супутника. Коефіцієнти G_{uc} та G_{uj} є постійними та відповідають КП антени АС СРНС у верхній та нижній півсферах. Відповідно, коефіцієнт K_a (2) також є постійною величиною:

$$K_{a0} = \frac{P_j G_j G_{uj} \gamma_j B_c L_j}{P_c G_c G_{uc} \gamma_c B_j L_c K_p}. \quad (3)$$

Вихідні дані для ПП зі спрямованою антеною

Для цього випадку прийнято таке припущення: коефіцієнти G_{uc} та G_{uj} є постійними та відповідають КП антени АС СРНС у верхній та нижній півсферах. Коефіцієнт G_{cu} є постійним та дорівнює КП антени навігаційного супутника: $G_{cu} = G_c$. Коефіцієнт G_{ju} залежить від азимута та кута місця: $G_{ju} = G_j F(\varphi_u, \beta_u)$, де $F(\varphi_u, \beta_u)$ – ДС антени ПП. Тоді коефіцієнт K_a має залежність від кутів φ_u та β_u :

$$K_{as}(\varphi_u, \beta_u) = \frac{P_j G_j G_{uj} \gamma_j B_c L_j F(\varphi_u, \beta_u)}{P_c G_c G_{uc} \gamma_c B_j L_c K_p} = K_{a0} F(\varphi_u, \beta_u). \quad (4)$$

Для розрахунку $K_{as}(\varphi_u, \beta_u)$ використовують значення ДС реальних антен або їх апроксимації. Близькі до реальних значень $F(\varphi_u, \beta_u)$ можна отримати шляхом моделювання антени в спеціалізованих програмних середовищах (CST Studio Suite, Altair Feko тощо) або вимірювань [18, 19].

Одним із розповсюджених методів апроксимування ДС є функція Гауса [20]:

$$F(\varphi_u, \beta_u) = \exp\left(-\frac{2,772}{\varphi_{0,5}^2}(\varphi_u - \varphi_m) - \frac{2,772}{\beta_{0,5}^2}(\beta_u - \beta_m)\right), \quad (5)$$

де φ_m, β_m – напрямок головного максимуму ДС;

$\varphi_{0,5}, \beta_{0,5}$ – ширина ДС за рівнем половинної потужності.

Апроксимування ДС функцією Гауса є простим для обчислень, легко масштабується під будь-яку ширину ДС та відтворює гладку ДС без бічних пелюсток.

КП антени для відомої ширини ДС можна наближено розрахувати як [21]

$$G_j \approx \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \varphi_{0,5}^0 \beta_{0,5}^0} = \frac{41253}{\varphi_{0,5}^0 \beta_{0,5}^0}, \quad (6)$$

де $\varphi_{0,5}^0, \beta_{0,5}^0$ – ширина ДС за рівнем половинної потужності в градусах;

Ω_A – тілесний кут головної пелюстки ДС.

Для планарних антен більш точним для оцінювання КП є вираз [21]

$$G_j \approx \frac{32400}{\varphi_{0,5}^0 \beta_{0,5}^0}. \quad (7)$$

Розв'язок рівняння РП для ПП із неспрямованою антеною

Застосуємо відомі формули для розрахунку відстані між двома точками в декартовій системі координат [22] та запишемо похилі дальності як $R_j^2 = x_u^2 + y_u^2 + (z_u - H_j)^2$ і $R_c^2 \approx H_c^2$ ($H_c \gg z_u$). Підставимо R_j^2 та R_c^2 у (2) та отримаємо таке рівняння сфери:

$$x_u^2 + y_u^2 + (z_u - H_j)^2 = R_{s0}^2, \quad (8)$$

де

$$R_{s0} = \sqrt{K_{a0}} H_c. \quad (9)$$

Аналіз виразів (8)–(9) дозволяє зробити висновок, що межа зони РП у просторі являє собою сферу з радіусом R_{s0} та центром у точці: $x_0 = 0$; $y_0 = 0$; $z_0 = H_j$.

Межа зони РП на поверхні є колом із радіусом r_s , який із (8) можна обчислити як

$$r_s = \sqrt{K_{a0}H_c^2 - (H_u - H_j)^2}. \quad (10)$$

З (10) видно, що радіус зони РП на поверхні залежить від висоти польоту ЗПН: з її збільшенням – зменшується.

Розв'язок рівняння РП для ПП зі спрямованою антеною

Отримаємо рівняння (8) у сферичній системі координат, які пов'язані з координатами в декартовій системі виразами:

$$x_u = R_u \cos \beta_u \cos \varphi_u; \quad y_u = R_u \cos \beta_u \sin \varphi_u; \quad z_u = R_u \sin \beta_u. \quad (11)$$

Підставивши вираз (11) у (8), отримаємо рівняння сфери, що описує межу зони РП у просторі у сферичній системі координат:

$$R_u^2 - 2H_j \sin \beta_u R_u + H_j^2 - R_s^2(\varphi_u, \beta_u) = 0, \quad (12)$$

де $R_s(\varphi_u, \beta_u)$ – радіуси сфер, що обчислюються за (9) шляхом заміни K_{a0} на $K_{as}(\varphi_u, \beta_u)$.

Вираз (12) являє собою зведене квадратне рівняння із коефіцієнтами [23]:

$$p(\beta_u) = 2H_j \sin \beta_u; \quad q(\varphi_u, \beta_u) = H_j^2 - R_s^2(\varphi_u, \beta_u). \quad (13)$$

Щоб обчислити значення $R_s(\varphi_u, \beta_u)$ для заданих кутів φ_u, β_u , потрібно розв'язати рівняння (12) за відомими виразами [23]:

$$D(\varphi_u, \beta_u) = p^2(\beta_u) - 4q(\varphi_u, \beta_u); \quad R_{u1,2}(\varphi_u, \beta_u) = \frac{-p(\beta_u) \pm \sqrt{D(\varphi_u, \beta_u)}}{2}, \quad (14)$$

де $D(\varphi_u, \beta_u)$ – дискримінант зведеного квадратного рівняння.

Результати $R_{u1,2}(\varphi_u, \beta_u)$, отримані за формулою (14), беруться зі значеннями більше нуля, оскільки радіус не може бути від'ємним.

Із (12)–(14) видно, що межа зони РП у просторі ПП зі спрямованою антеною являтиме собою тривимірну фігуру, сформовану точками з поверхонь сфер (12), обчислених для кутів у діапазонах $\varphi_u = [-\pi \ \pi]$, $\beta_u = [-\pi/2 \ \pi/2]$, з урахуванням значень нормованої ДС. Розрахунок зони РП у просторі буде здійснюватися за виразами (9), (13) та (14) для різних кутів φ_u та β_u . У (9) замість коефіцієнта K_{a0} використовуємо $K_{as}(\varphi_u, \beta_u)$.

Зона РП на поверхні ПП зі спрямованою антеною розраховується як проєкція на земну поверхню його зони РП у просторі, отримана для заданої висоти польоту ЗПН.

Обчислення зони РП можна спростити, якщо в припущеннях прийняти $H_j = 0$. Тоді із (12) отримаємо

$$R_u(\varphi_u, \beta_u) = H_c \sqrt{K_{a0}} \sqrt{F(\varphi_u, \beta_u)} = R_{s0} \sqrt{F(\varphi_u, \beta_u)}. \quad (15)$$

Із (15) видно, що форма зони РП визначається як корінь квадратний із ДС антени ПП.

Відповідно до отриманого вище математичного апарату розроблено дві методики розрахунку зон РП ПП приймачам сигналів СРНС із неспрямованою та спрямованою антенами.

Методика розрахунку зон РП ПП із неспрямованою антеною

Вихідними даними для розрахунку є параметри навігаційного супутника ($P_c, G_c, B_c, \gamma_c, H_c$), ПП ($P_j, G_j, B_j, \gamma_j, H_j, K_p$), ЗПН (G_{uj}, G_{uc}) та втрати в атмосфері (L_c, L_j).

Методика розрахунку включає п'ять етапів.

1. Розрахунок коефіцієнта K_{a0} за формулою (3).
2. Розрахунок координат центра сфери ($x_0 = 0; y_0 = 0; z_0 = H_j$), що описує межу зони РП у просторі, та її радіуса R_{s0} за формулою (9).
3. Розрахунок радіуса кола r_s , що формує межу зони РП на поверхні для заданої висоти польоту ЗПН, за формулою (10).
4. Розрахунок масивів координат точок сфери, що формує зону РП у просторі:

$$y_u[i, j] = \pm \sqrt{R_{s0}^2 - x_u^2[i] - (z_u[j] - z_0)^2};$$

$$x_u[i] \in [-R_{s0} \quad R_{s0}]; z_u[j] \in [z_0 - R_{s0} \quad z_0 + R_{s0}].$$
(16)

5. Розрахунок масивів координат точок кола, що формує зону РП на поверхні:

$$y_u[i] = \sqrt{r_s^2 - x_u^2[i]}; x_u[i] \in [-r_s \quad r_s].$$
(17)

Методика розрахунку зон РП ПП зі спрямованою антеною

Блок-схему методики, що відображає етапи розрахунку зони РП у просторі ПП зі спрямованою антеною, зображено на рис. 2.

Вихідними даними для розрахунку є параметри навігаційного супутника ($P_c, G_c, B_c, \gamma_c, H_c$), ПП ($P_j, G_j, F(\varphi_u, \beta_u), \varphi_{0,5}, \beta_{0,5}, \varphi_m, \beta_m, B_j, \gamma_j, H_j, K_p$), ЗПН (G_{uj}, G_{uc}) та втрати в атмосфері (L_c, L_j) (блок 1).

Методика складається із п'яти етапів.

1. Розрахунок постійного коефіцієнта K_{a0} за формулою (3) (блок 2).
2. Формування двох циклів для зміни значень азимута та кута місця із заданими кроками $\Delta\varphi$ і $\Delta\beta$ (блоки 3–4).
3. Розрахунок радіуса сфери $R_s(\varphi_u, \beta_u)$, що формує межу зони РП у просторі, за виразами (9) та (4) (блок 5).
4. Обчислення дальності РП за виразами (13) та (14). Якщо вона додатна, то відбувається внесення до масиву $R_u(\varphi_u, \beta_u)$ (блок 6).
5. Розрахунок межі зони РП у просторі в декартовій системі координат $x_u(\varphi_u, \beta_u), y_u(\varphi_u, \beta_u), z_u(\varphi_u, \beta_u)$ за виразами (11) (блок 7). Зона РП буде знаходитися в межах тривимірної фігури, що описується $x_u(\varphi_u, \beta_u), y_u(\varphi_u, \beta_u), z_u(\varphi_u, \beta_u), (R_u(\varphi_u, \beta_u))$ у сферичній системі координат).

Якщо $H_j = 0$, то методика розрахунку значно спрощується: циклічні розрахунки в етапах 2–4 замінюються розрахунками за формулою (15).

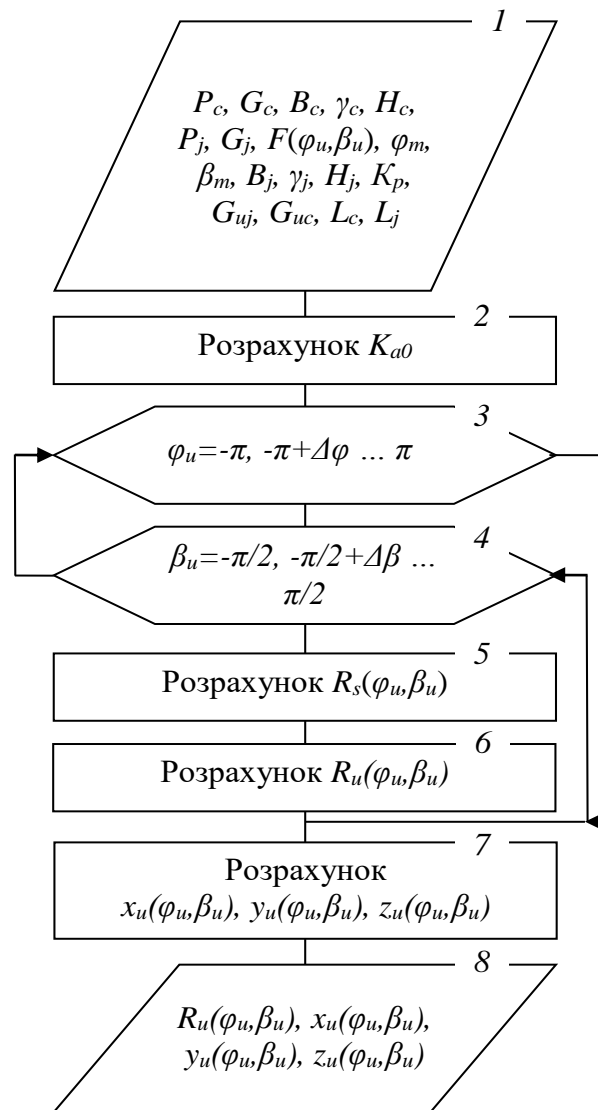


Рис. 2. Блок-схема методики розрахунку зон РП ІІІ зі спрямованою антеною

Практичне використання методик розрахунку зон РП

На основі запропонованого математичного та методичного апаратів у програмному середовищі MATLAB розроблено спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє проводити автоматизовані розрахунки зон РП ІІІ приймачам сигналів СРНС.

Розглянемо два приклади визначення зон РП ІІІ приймачам сигналів СРНС.

Розрахунки проведено для РП приймачів АС СРНС “NAVSTAR” за таких вхідних даних [24]: $H_c = 20180$ км; $P_c = 30$ Вт; $G_c = 13$ дБі; $B_c = 2$ МГц; $G_{uc} = 4$ дБ; $\gamma_c = 0$ дБ; $L_j = L_c = 0$ дБ; $K_p = 40$ дБ.

Розрахунок зон РП ІІІ із неспрямованою антеною

Вхідні дані: $P_j = 25$ Вт; $B_j = 2$ МГц; $G_j = 1$ дБі; $G_{uj} = -3$ дБі; $\gamma_j = -3$ дБ; $H_j = 50$ м.

У результаті обчислень із використанням запропонованої методики отримано радіус зони РП у просторі $R_s = 14,6$ км.

Графічне зображення зони РП у просторі наведено на рис. 3, а її проєкції на земну поверхню для різних висот H_u (зони РП на поверхні) – на рис. 4.

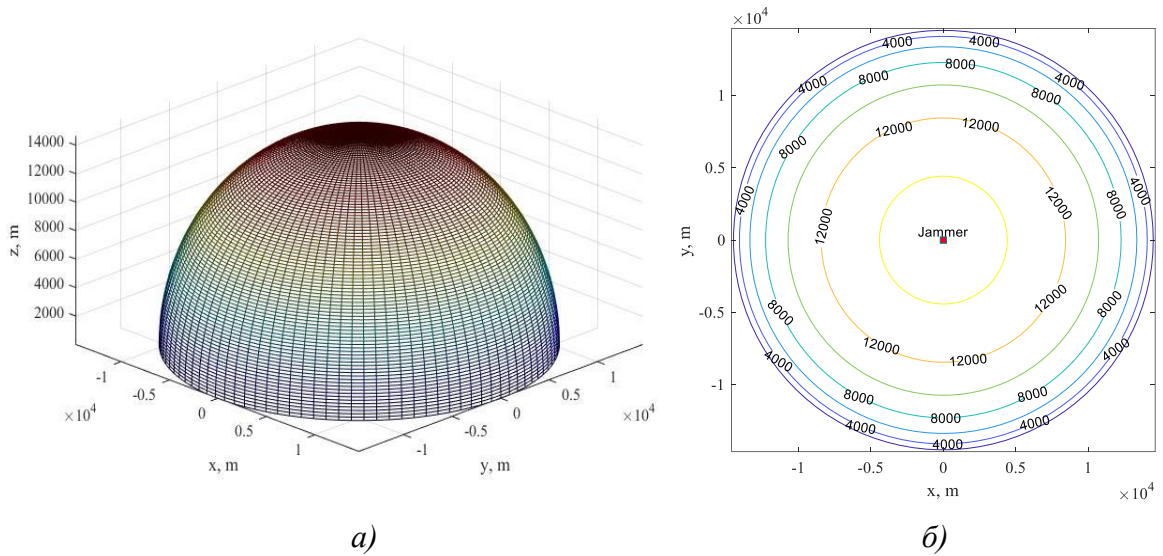


Рис. 3. Зони РП ПП із неспрямованою антеною:
 а) у просторі; б) на поверхні залежно від висоти ЗПН

Із рис. 3 видно, що межа зони РП у просторі формується сферою із радіусом $R_s = 14,6$ км, а на поверхні – колом, радіус якого залежить від висоти польоту ЗПН.

Розрахунок зон РП ПП зі спрямованою антеною

Вхідні дані: $P_j = 40$ Вт; $B_j = 2$ МГц; $\varphi_{0,5} = 60^\circ$; $\beta_{0,5} = 30^\circ$; $\varphi_m = 0$, $\beta_m = 15^\circ$, $G_{uj} = -3$ дБі; $\gamma_j = -3$ дБ; $H_j = 50$ м.

Коефіцієнт підсилення антени, обчислений за формулою (7), дорівнює $G_j = 12,5$ дБі.

Розрахунок зони РП здійснюватимемо із кроками $\Delta\varphi = \Delta\beta = 1^\circ$.

У результаті розрахунків, проведених за методикою (рис. 2), отримано зону РП у просторі, графічне зображення якої наведено на рис. 4, а її проєкцій на земну поверхню для різних висот H_u (зони РП на поверхні) – на рис. 5.

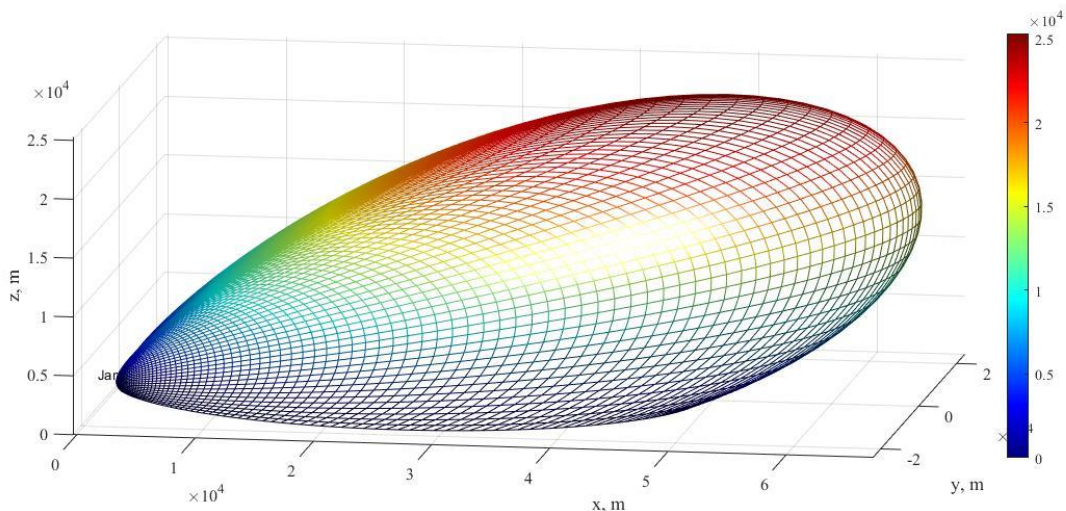


Рис. 4. Зона РП у просторі ПП зі спрямованою антеною

Із рис. 4–5 випливає, що форма зони РП залежить від форми ДС засобу РЕБ та напрямку її головного максимуму. Дальність РП залежить від азимута на ЗПН та висоти його польоту. Для проведених розрахунків максимальна ортодромічна дальність РП

засобу РЕБ для висоти польоту ЗПН 500 м становить $D_j^{max} \approx 50,4$ км. Зі збільшенням висоти дальність РП зменшується, а межа зони РП на поверхні віддаляється від місця розташування ПП. Величина зміщення межі зони РП зростає зі збільшенням напрямку головної пелюстки ДС за кутом місця.

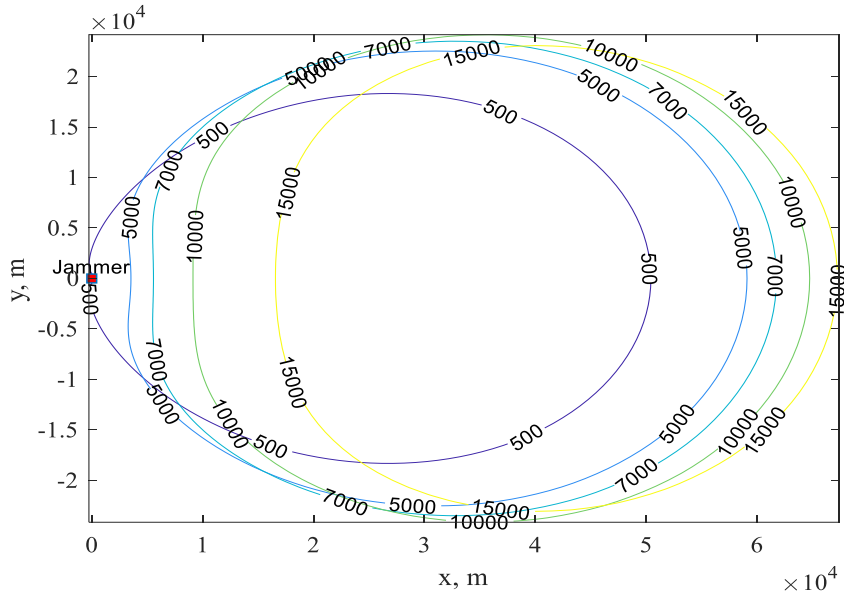


Рис. 5. Зони РП на поверхні ПП зі спрямованою антеною залежно від висоти ЗПН

Для невеликих значень висот польоту ЗПН під час попередніх розрахунків зону РП засобу РЕБ зі спрямованою антеною можна подати у вигляді сектора круга шириною $\varphi_{0,5}^0$ та центром у місці розміщення ПП, як показано на рис. 6. Радіус сектора є пропорційним максимальній дальності РП, а коефіцієнт пропорційності залежить від ширини ДС та напрямку головної пелюстки.

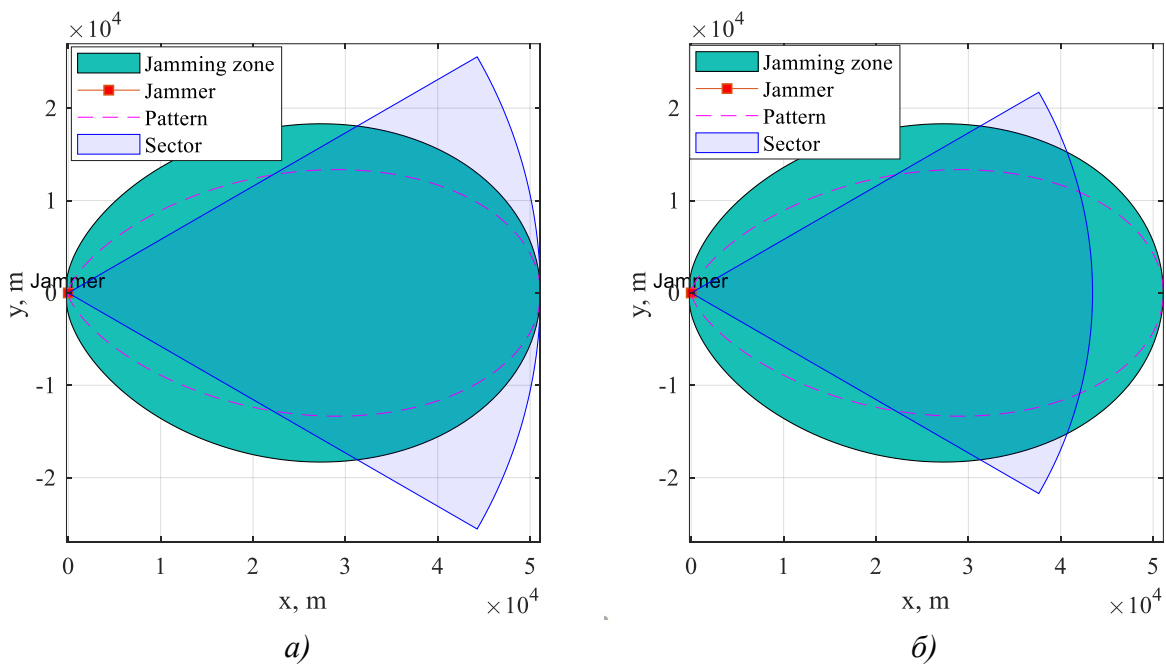


Рис. 6. Зона РП на поверхні, ДС та сектор круга шириною $\varphi_{0,5}^0$ та радіусом: а) D_j^{max} ; б) $0,85D_j^{max}$

Для висот польоту ЗПН, за яких зона РП на поверхні зміщується відносно ПП у напрямку головного максимуму його ДС та стає більш опуклою, апроксимація сектором круга буде неправильною. У таких випадках у практичних розрахунках зон дії засобів РЕБ потрібно використовувати проєкції зони РП у просторі на земну поверхню, розраховані для заданої ймовірної максимальної висоти польоту ЗПН.

Розрахунок зони РП ПП із неспрямованою антеною, проведений вище, показав, що вона має форму сфери, обмеженої знизу земною поверхнею. Однак на практиці в багатьох засобах РЕБ використовують слабоспрямовані антени на основі напівхвильових вібраторів із ДС у вигляді тороїда, що описується таким математичним виразом [21]:

$$F(\varphi_u, \beta_u) = \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos(\beta_u)\right)}{\sin(\beta_u)} \right)^2 \tag{18}$$

Зону РП ПП із антеною у вигляді напівхвильового вібратора, розраховану за виразом (15), зображено на рис. 7, а їх проєкції на земну поверхню – на рис. 8.

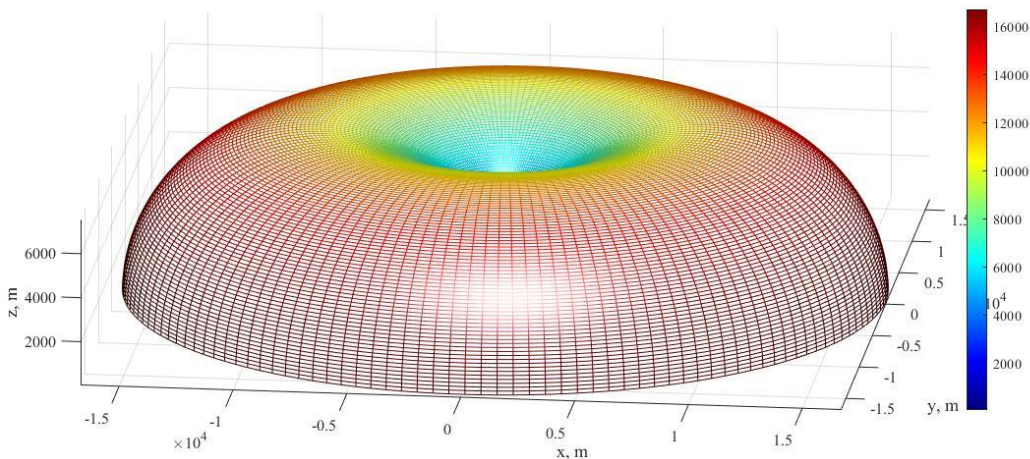


Рис. 7. Зона РП у просторі ПП із антеною у вигляді напівхвильового вібратора

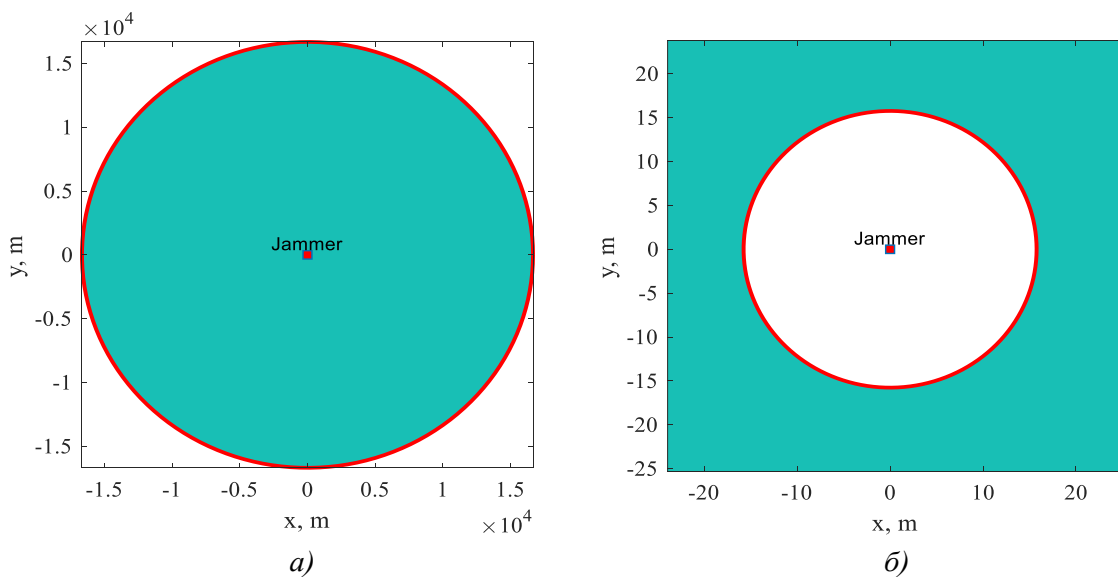


Рис. 8. Зони РП на поверхні ПП із антеною у вигляді напівхвильового вібратора для $H_u = 500$ м

Проекція на рис. 8б збільшена в масштабі для кращого відображення центральної її частини. Обчислення проведені для вхідних даних, що використовувалися в розрахунках для ПП із неспрямованою антеною.

Із рис. 7–8 видно, що зона РП на поверхні ПП із ДС у вигляді тороїда є кільцем із зовнішнім радіусом r_s та внутрішнім r_{s0} . Всередині внутрішнього круга РП відсутнє (зона неподавлення). Зі збільшенням висоти польоту ЗПН радіус зони неподавлення r_{s0} зростає, що потрібно враховувати в разі застосування ПП із такою антеною.

Радіус зони неподавлення ПП із напівхвильовим вібратором можна розрахувати за такими рівняннями:

$$\frac{\cos(\beta_H)\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos(\beta_H)\right)}{\sin(\beta_H)} = \frac{H_u}{R_s}; \quad r_{s0} = R_s \cos\left(\frac{\pi}{2}\cos(\beta_H)\right), \quad (19)$$

де $\beta_H \in [-\pi/2 \ \pi/2]$ – кут місця, що відповідає висоті ЗПН H_u , для якої визначається зона РП на поверхні.

Графіки залежностей r_{s0} від H_u для різної максимальної дальності РП, отримані шляхом ітераційного розв’язання рівнянь (19), зображено на рис. 9.

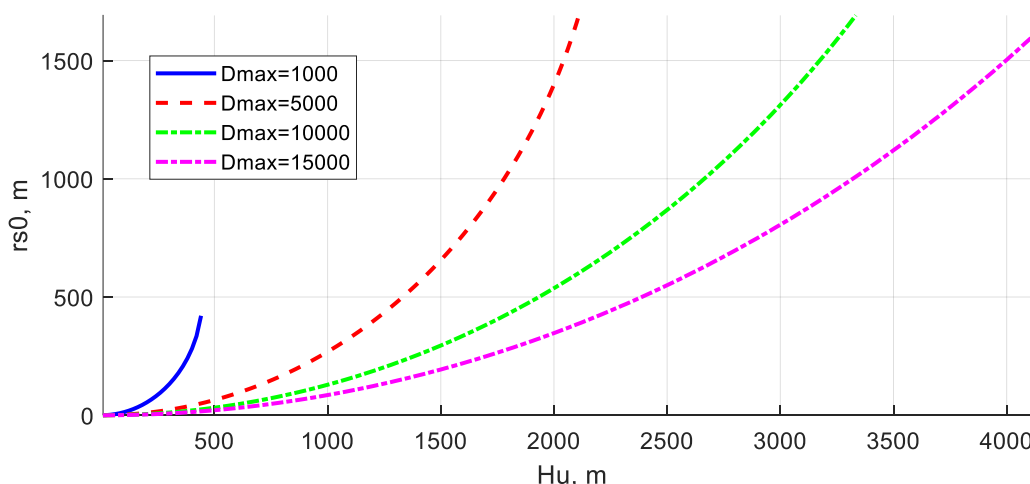


Рис. 9. Графіки залежностей r_{s0} від H_u та D_j^{max}

Із рис. 9 видно, чим більша дальність РП ПП із тороїдною ДС, тим менший радіус зони неподавлення r_{s0} , що обчислюється для заданого значення висоти польоту ЗПН. Слід зазначити, що на малих висотах у багатьох практичних випадках зоною неподавлення навколо ПП можна знехтувати, оскільки ймовірність проходження крізь неї ЗПН дорівнюватиме [25]

$$P_{nj} = \frac{\pi r_{s0}^2}{\pi r_s^2} = \left(\frac{r_{s0}}{r_s}\right)^2. \quad (20)$$

Для прикладу, наведеного на рис. 8, ймовірність проходження ЗПН крізь зону неподавлення дорівнює $P_{nj} = 8,8 \cdot 10^{-7}$. Крім того, час знаходження ЗПН у такій зоні буде недостатнім для відновлення роботи навігаційного приймача [26].

Висновки. Запропоновані математичний та методичний апарати дозволяють розраховувати зони РП ПП приймачам АС СРНС, враховують основні технічні параметри апаратури СРНС і ПП, ДС антени ПП, а також її поляризацію та висоту розміщення.

Зона РП ПП із неспрямованою антеною в просторі обмежується сферою. У разі використання в засобі РЕБ спрямованої антени форма зони РП визначається характеристиками ДС: формою та напрямком головного максимуму.

Для ПП зі неспрямованою антеною та напівхвильовим вібратором (за певних обмежень) зона РП на поверхні є кругом із центром у місці розташування ПП. Зону РП ПП зі спрямованою антеною на поверхні можна наближено апроксимувати сектором круга, радіус, кут розкриття та початкові координати якого залежать від форми ДС, напрямку головної пелюстки антени та висоти польоту ЗПН.

Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на розроблення методики розміщення засобів РЕБ на місцевості для забезпечення одночасної дії визначеної кількості ПП на АС СРНС.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Адаменко А., Порохончук О. Перспективи застосування бортових засобів радіоелектронної боротьби для захисту військової техніки протиповітряної оборони від сучасних повітряних засобів ураження противника // Системи озброєння і військова техніка. 2025. № 2 (82). С. 42–49. <https://doi.org/10.30748/soivt.2025.82.06>
2. Шолохов С., Самборський І., Вакуленко О., Ніколаєнко Б. Завадозахист радіоелектронних засобів. Ч. 1. Основи завадозахисту систем зв'язку. Київ : КПІ. 2021. 210 с.
3. Бибик Р., Опірський І. Електромагнітні загрози в сучасних конфліктах: аналіз характеристик джерел РЕБ та їх вплив на ефективність систем засобів ураження // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 3 (27). С. 193–204. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.748>
4. Лось А., Жирна О. Результати експерименту використання навігаційних антен з контрольованою діаграмою спрямованості на БПЛА в зонах активного подавлення засобами радіоелектронної боротьби // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОВТ. 2024. № 1 (19). С. 73–80. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.09>
5. Панченко І., Бондаренко Д., Липський О., Стефанишин Я. Аналіз підходу до захисту від завад супутникових навігаційних приймачів БПЛА // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. Київ : ВІТІ, 2024. № 5. С. 108–118. <https://doi.org/10.58254/viti.5.2024.10.108>
6. Givhan C., Martin S. Comparison of CRPA Direction of Arrival Methods on Post Correlated GNSS Signals for Solution Authentication and Spoofing Detection // Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation. California, 2023. P. 303–314. <https://doi.org/10.33012/2023.18625>
7. ВСТ 602.001:2024(01) Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба. Терміни та визначення / Управління стандартизації, кодифікації та каталогізації. Київ, 2024. 49 с.

8. Meheretu S., Nigussie E., Gebremeskel G., Hailesilassie S. A Systematic Literature Review on Spoofing and Jamming Approaches in Unmanned Aerial Vehicles Navigation // *Aerosp. Technol. Manag.* 2025. № 17. P. 1–21. <https://doi.org/10.1590/jatm.v17.1396>
9. Overview of Jamming Technology for Satellite Navigation / X. Li, L. Chen, Z. Lu, F. Wang, W. Liu // *Machines.* 2023. Vol. 11. № 7. P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/machines11070768>
10. Lubbers B. GNSS Accuracy Under White Gaussian Noise Jamming // *Eng. Proc.* 2025. № 88. P. 1–9. <https://doi.org/10.3390/engproc2025088026>
11. Shaheen E., Elgamel S. Mathematical Analyses of the GPS Receiver Interference Tolerance and Mean Time to Loss Lock // *Defence Technology.* 2019. № 15. P. 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.001>
12. Adamy D. *Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare.* 2009. 348 p.
13. Morong T., Puricer P., Kovár P. Study of the GNSS Jamming in Real Environment // *Intl. Journal of Electronics and Telecommunications.* 2019. Vol. 65, № 1. P. 65–70. <https://doi.org/10.24425/ijet.2019.126284>
14. Конін В., Харченко В. Системи супутникової радіонавігації. Київ : Холтех, 2010. 520 с.
15. Saakian A. *Radio Wave Propagation Fundamentals.* 2nd ed. Artech, 2021. 418 p.
16. Saunders S., Zavala A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems.* 2nd ed. John Wiley & Sons, 2007. 553 p.
17. Нагорнюк О. Дослідження впливу періодичної ковзної за частотою радіоперешкоди на радіоканал LoRa // *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування.* 2024. № 98. С. 30–37. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.98.30-37>
18. Пантелят М., Мясоєдов П. Електромагнітна сумісність технічних об’єктів і систем: попередній огляд деяких програмних засобів для комп’ютерного моделювання // *Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2025. № 1 (13). С. 21–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.05>
19. Breinbjerg O., Castañer M., Gregson S., Eibert T. Antenna Measurement Challenges and Opportunities // *Reviews of Electromagnetics.* 2023. P. 1–49. <https://doi.org/10.53792/RoE/2023/23003>
20. Schott P., Lemaître F., Pascal O. Use of Gaussian Beams to Compute Antenna Pattern // *Ann. Telecommun.* 2002. Vol. 57. P. 75–797. <https://doi.org/10.1007/BF02995518>
21. Balanis C. *Antenna Theory Analysis and Design.* 4th ed. John Wiley & Sons. New Jersey, 2016. 1072 p.
22. Vince J. *Foundation Mathematics for Computer Science. A Visual Approach.* 4th ed. Springer Nature Switzerland AG, 2024. 638 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-66549-3>
23. Croft A., Davison R. *Mathematics for Engineers.* 5th ed. Pearson Education Limited, 2019. 1259 p.
24. Betz W. *Navstar Global Positioning System. Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers* // *IEEE.* 2016. P. 163–200. <https://doi.org/10.1002/9781119141167.ch7>
25. Bertsekas D., Tsitsiklis J. *Introduction to Probability.* Massachusetts Institute of Technology, 2000. 284 p.

26. Костріков О., Світенко М., Семироз А., Стригун В. Аналіз можливості застосування апаратури споживачів ГНСС для оцінювання параметрів траєкторії руху об'єктів на випробуваннях // 36. наук. праць ДНДІ ВС ОВТ. 2025. № 3 (25). С. 42–52. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.25.2025.06>

Стаття надійшла до редакції 23.02.2026.

Прийнято до друку 15.03.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Adamenko, A., & Porokhonchuk, O. (2025). Perspektyvy zastosuvannia bortovykh zasobiv radioelektronnoi borotby dlia zakhystu viiskovoi tekhniky proty povitrianoi obrony vid suchasnykh povitrianykh zasobiv urazhennia protyvnyka [Prospects for the Use of Airborne Electronic Warfare Equipment to Protect Military Air Defense Equipment from Modern Enemy Air Weapons]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Armament Systems and Military Equipment]*, 2 (82), 42–49. <https://doi.org/10.30748/soivt.2025.82.06> [in Ukrainian].
2. Sholokhov, S., Samborskyi, I., Vakulenko, O., & Nikolaienko, B. (2021). *Zavadozakhyst radioelektronnykh zasobiv. Ch. 1. Osnovy z avadozakhystu system zviazku [Interference Protection of Radio Electronic Devices. Part 1. Fundamentals of Interference Protection of Communication Systems]*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Bybyk, R., & Opirskyi, I. (2025). Elektromahnitni zahrozy v suchasnykh konfliktakh: analiz kharakterystyk dzherel REB ta yikh vplyv na efektyvnist system zasobiv urazhennia [Electromagnetic Threats in Modern Conflicts: Analysis of the Characteristics of Electronic Warfare Sources and Their Impact on the Effectiveness of Weapons Systems]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika [Cybersecurity: Education, Science, Technology]*, 3 (27), 193–204. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.27.748> [in Ukrainian].
4. Los, A., & Zhyrna, O. (2024). Rezultaty eksperymentu vykorystannia navihatsiinykh anten z kontrolovanoiuh diahramoiuh spriamovanosti na BPLA v zonakh aktyvnoho podavlennia zasobamy radioelektronnoi borotby [Results of the Experiment Using Navigational Antennas with Controlled Reception Pattern Antenna for UAVs in Areas of Active Suppression by Electronic Warfare Means]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 1 (19), 73–80. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.09> [in Ukrainian].
5. Panchenko, I., Bondarenko, D., Lypskyi, O., & Stefanyshyn, Ya. (2024). Analiz pidkhodu do zakhystu vid zavad suputnykovykh navihatsiinykh pryimachiv BpLA [Analysis of the Approaches to Protection Against Interference of UAV Satellite Navigation Receivers]. *Systemy i tekhnolohii zviazku, informatyzatsii ta kiberbezpeky [Communication, Informatization and Cybersecurity Systems and Technologies]*, 5, 108–118. Kyiv <https://doi.org/10.58254/viti.5.2024.10.108> [in Ukrainian].
6. Givhan, C., & Martin, S. (2023). Comparison of CRPA Direction of Arrival Methods on Post Correlated GNSS Signals for Solution Authentication and Spoofing Detection. In Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation. California. (pp. 303–314). <https://doi.org/10.33012/2023.18625>

11. VST 602.001-2024 (01). *Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba. Terminy ta vyznachennia [Electromagnetic and Cyber Warfare. Electronic Warfare. Terms and definitions]*. Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_1209_66c84a8f9944e.pdf [in Ukrainian].
8. Meheretu, S., Nigussie, E., Gebremeskel, G., & Hailesilassie, S. (2025). A Systematic Literature Review on Spoofing and Jamming Approaches in Unmanned Aerial Vehicles Navigation. *Aerosp. Technol. Manag*, 17, 1–21. <https://doi.org/10.1590/jatm.v17.1396>
9. Li, X., Chen, L., Lu, Z. Wang, F., & Liu, W. (2023) Overview of Jamming Technology for Satellite Navigation. *Machines*, 11, 7, 1–29. <https://doi.org/10.3390/machines11070768>
10. Lubbers, B. (2025). GNSS Accuracy under White Gaussian Noise Jamming. *Eng. Proc*, 88, 1–9. <https://doi.org/10.3390/engproc2025088026>
11. Shaheen, E., & Elgamel, S. (2019). Mathematical Analyses of the GPS Receiver Interference Tolerance and Mean Time to Loss Lock. *Defence Technology*, 15, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.001>
12. Adamy, D. (2009). *Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare*. Artech house.
13. Morong, T., Puricer, P., & Kovár, P. (2019). Study of the GNSS Jamming in Real Environment. *Intl. Journal of Electronics and Telecommunications*, 65, 1, 65–70. <https://doi.org/10.24425/ijet.2019.126284>
14. Konin, V., & Kharchenko, V. (2010). *Systemy suputnykovoï radionavihatsii [Satellite Radio Navigation Systems]*. Kyiv [in Ukrainian].
15. Saakian, A. (2021). *Radio Wave Propagation Fundamentals*. 2nd ed.
16. Saunders, S., & Zavala, A. (2007). *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. 2nd ed.
17. Nahorniuk, O. (2024). Doslidzhennia vplyvu periodychnoi kovznoi za chastotoiu radiopereshkody na radiokanal LoRa [Investigation of Impact of Periodic Frequency Sweeping Radio Interference on LoRa Radio Channel]. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU “KPI”. Series Radio Engineering, Radio Equipment Manufacturing]*, 98, 30–37. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.98.30-37> [in Ukrainian].
18. Panteliat, M., & Miasoiedov, P. (2025). Elektromahnitna sumisnist tekhnichnykh obiektiv i system: poperednii ohliad deiakykh prohramnykh zasobiv dlia kompiuternoho modeliuvannia [Electromagnetic Compatibility of Technical Objects and Systems: A Preliminary Review of Some Software for Computer Modelling]. *Visnyk NTU “KhPI”. Serii – Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teorii i praktyka [Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]*, 1 (13), 21–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.05> [in Ukrainian].
19. Breinbjerg, O., Castañer, M., Gregson, S., & Eibert, T. (2023). Antenna Measurement Challenges and Opportunities. *Reviews of Electromagnetics*, 1–49. <https://doi.org/10.53792/RoE/2023/23003>
20. Schott, P., Lemaître, F., & Pascal, O. (2002). Use of Gaussian Beams to Compute Antenna Pattern. *Ann. Telecommun*, 57, 75–797. <https://doi.org/10.1007/BF02995518>
21. Balanis, C. (2016). *Antenna Theory Analysis and Design*. 4th ed.
22. Vince, J. (2024). *Foundation Mathematics for Computer Science. A Visual Approach*. 4th ed. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-66549-3>

23. Croft, A., & Davison, R. (2019). *Mathematics for Engineers*. 5th ed.

24. Betz, W. (2016). Navstar Global Positioning System. *Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers*. *IEEE*, 163–200. <https://doi.org/10.1002/9781119141167.ch7>

25. Bertsekas, D., & Tsitsiklis, J. (2000). *Introduction to Probability*.

26. Kostrikov, O., Svitenko, M., Semyroz, A., & Stryhun, V. (2025). Analiz mozhyvosti zastosuvannya aparatury spozhyvachiv HNSS dlia otsiniuvannya parametriv traiektorii rukhu ob'ektiv na vyprobuvanniakh [Analysis of the Possibility of Using GNSS Consumer Equipment to Estimate the Parameters of the Trajectory of Objects in Tests]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 3 (25), 42–52. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.25.2025.06> [in Ukrainian].

O. A. Nahorniuk

METHODS FOR CALCULATING RADIO JAMMING ZONES OF INTERFERENCE TRANSMITTERS AGAINST GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM RECEIVERS

Jamming of radio receivers of global navigation satellite system user equipment employed by aerial attack assets is one of the effective means of countering them. To reduce the impact of radio interference in global navigation satellite systems, the adversary employs compact adaptive antenna arrays based on Controlled Reception Pattern Antenna (CRPA) technology, with the number of elements in such arrays continuously increasing. Suppression of receiving equipment equipped with these interference-resistant antenna arrays requires the simultaneous use of a set of spatially distributed electronic warfare assets. Planning the deployment of such assets, as well as defining requirements for them, involves the use of mathematical and methodological tools for calculating the characteristics and parameters of their radio jamming zones. A mathematical framework for modeling the process of radio jamming of navigation receivers, which is based on analytical expressions describing radio signal propagation in free space and in the atmosphere, is developed in the article. Two methods are proposed for calculating the radio jamming zones of electronic warfare assets with omnidirectional and directional antennas, as well as their projections onto the Earth's surface. The calculations take into account the technical parameters of radio navigation equipment, interference transmitters, the shapes of their antenna radiation patterns, and atmospheric propagation losses. Software for calculating and visualizing the radio jamming zones of interference transmitters in space and on the surface was developed in the MATLAB environment. Three examples of calculating the coverage areas of radio jamming assets with omnidirectional, weakly directional, and directional antennas are presented. It is shown that, under certain conditions, the radio jamming zones of electronic warfare assets on the Earth's surface can be approximated with sufficient accuracy by a circle or a circular sector.

Keywords: methodology; radio jamming; global navigation satellite system; radio jamming zone; interference transmitter; aerial attack asset.

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.05

УДК 621.376

В. М. Котенко, канд. техн. наук, доц.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0009-0003-4177-6841>

В. Д. Прокопович
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0009-0006-3797-5303>

О. В. Самонюк
<https://orcid.org/0009-0002-4177-6841>

Ю. В. Синицький
Науково-дослідний інститут воєнної розвідки
<https://orcid.org/0009-0009-3658-358X>

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОРЕЛЯЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ БАГАТОЧАСТОТНИХ АМПЛІТУДНО-МОДУЛЬОВАНИХ РАДІОСИГНАЛІВ

У статті наведено результати дослідження одномірних та двомірних кореляційних функцій багаточастотних радіосигналів, утворених шляхом фазової модуляції імпульсного амплітудно-модульованого радіосигналу надвисокої частоти гармонічним коливанням проміжної частоти у фазовому модуляторі. На основі отриманих виразів для одномірних та двомірних кореляційних функцій комплексної обвідної багаточастотного амплітудно-модульованого сигналу на виході фазового модулятора проаналізовано їх кореляційні властивості залежно від параметрів модуляції. Встановлено, що вид обвідної одномірної кореляційної функції визначається індексом фазової модуляції та величиною відносної частоти гармонічної модуляції, а саме індекс фазової модуляції окреслює кількість бічних максимумів обвідної та їх амплітуду, а відносна частота гармонічної модуляції – характер порізаності обвідної. Ширина головного піку одномірної кореляційної функції визначається ефективною шириною спектра багаточастотного амплітудно-модульованого сигналу, який залежить від індексу фазової модуляції та частоти модулюючої напруги. Поверхня двомірної кореляційної функції є багатопіковою. Кількість бічних максимумів на площі поверхні, сумірних за величиною з основним, знаходимо за частотою модулюючого коливання та тривалістю радіоімпульсу. Перекриття за частотою спектрів парціальних радіоімпульсів зумовлює появу на частотно-часовій площині двомірної кореляційної функції додаткових гребенів, паралельних основному.

За характером зміни кореляційних властивостей від параметрів модуляції багаточастотний амплітудно-модульований сигнал можна віднести до сімейства шумоподібних. Формування багаточастотних амплітудно-модульованих сигналів здійснюється одноканальними пристроями, а до каскадів підсилення потужності не

© В. М. Котенко, В. Д. Прокопович, О. В. Самонюк, Ю. В. Синицький, 2026

висуваються жорсткі вимоги щодо обмеження за лінійністю. Практичне застосування досліджуваних сигналів надає можливість потенційно підвищити енергетичну та структурну розвідзахищеність систем радіозв'язку та радіолокації, здійснювати адаптування їх режимів роботи до радіоелектронної обстановки.

Ключові слова: амплітудна модуляція; фазова модуляція; багаточастотний радіосигнал; кореляційна функція; енергетична та структурна прихованість.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Використання складних ширококутових радіосигналів із внутрішньоімпульсною (внутрішньоперіодною) кутовою модуляцією (маніпуляцією) в телекомунікаційних системах, радіолокації та системах технічного захисту інформації, дослідження їх частотної структури й кореляційних властивостей є складовою загальної проблеми підвищення достовірності, прихованості, заводо захищеності та інформативності. Певну перевагу перед іншими видами складних сигналів із кутовою модуляцією має квазішумовий багаточастотний сигнал, утворений шляхом фазової модуляції гармонічного коливання високої частоти гармонічним сигналом проміжної частоти. Вивченню частотної структури та кореляційних властивостей сформованого вказаним методом сигналу в науково-технічній літературі приділялося мало уваги. Тому актуальним є розроблення математичного апарату дослідження кореляційних функцій комплексної обвідної багаточастотних (БЧ) амплітудно-модульованих (АМ) сигналів та аналізу їх кореляційних властивостей від параметрів модуляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування складних ширококутових радіосигналів у системах зв'язку та завдання з оцінювання прихованості каналів зв'язку досліджено в роботах П. Ю. Костенка [1], О. В. Кувшинова, Р. М. Вознюка [2], Н. В. Захарченка [3], В. В. Корчинського [4], К. С. Васюти [5, 6] та ін. Принципам формування радіосигналів із кутовою модуляцією та адаптації режимів роботи радіотехнічних засобів присвячені роботи В. І. Гомозова [7], В. А. Таршина, В. С. Залевського [8] тощо. Розв'язання задач розпізнавання виду модуляції викладено в роботах В. О. Хорошка [9], О. А. Нагорнюка [10], М. В. Sabbar і А. Н. Rasool [11], В. М. Котенка, В. Д. Меленського [12]. Проте на цей час не досліджувалися одномірні та двомірні кореляційні функції комплексної обвідної БЧ АМ сигналу та характерні зміни параметрів їх обвідних залежно від параметрів модуляції, не розроблений математичний апарат, що дозволяв би проводити вказаний аналіз. Не приділялася увага аналізу величини бокових пелюсток кореляційних функцій та можливостей його практичного застосування.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є провести дослідження одномірної та двомірної кореляційних функцій комплексної обвідної БЧ АМ сигналу, визначити характерні залежності їх кореляційних властивостей від параметрів модуляції й надати рекомендації щодо практичного застосування БЧ АМ сигналів.

Виклад основного матеріалу

Одномірні та двомірні кореляційні функції БЧ АМ сигналу. У наш час запропоновані, описані та експериментально досліджені різні пристрої формування багаточастотних радіосигналів [7, 13, 14]. Можливості їх практичної реалізації пов'язані

з певними успіхами, досягнутими в розробленні елементної бази, зокрема створено цифрові синтезатори частоти, що дозволяють формувати високостабільні радіосигнали проміжної частоти [7, 13]. Є широкий клас добре досліджених та освоєних промисловістю підсилювальних надвисокочастотних (НВЧ) приладів та фазових модуляторів. Створення твердотільних фазових модуляторів дозволило суттєво підвищити економічність, зменшити габарити, масу та вартість пристроїв формування та оброблення БЧ АМ радіосигналів [7, 13].

Аналіз відомих методів формування БЧ АМ сигналів показує, що найбільш доцільно застосовувати фазову просторово-часову модуляцію з використанням ламп рухомої хвилі або їх твердотільних аналогів [13, 15].

Спрощену структурну схему пристрою формування БЧ АМ сигналу з використанням фазового модулятора наведено на рис. 1.

На вхід фазового модулятора подається НВЧ АМ радіоімпульс одиначної амплітуди, комплексну обвідну якого подамо в такому вигляді:

$$U_{\text{вх}}(t) = \exp\{j(2\pi f_0 t + \varphi_0)\} \text{ для } |t| \leq \frac{\tau_i}{2}, \quad (1)$$

де f_0 , φ_0 – частота і початкова фаза НВЧ АМ радіоімпульсу тривалістю τ_i відповідно.

На вхід, що модулює, подається безперервне гармонічне модулююче коливання частоти F_M :

$$U_M(t) = U_M \sin(2\pi F_M t + \varphi_M), \quad (2)$$

де U_M , φ_M – амплітуда та початкова фаза гармонічного сигналу відповідно.

У разі взаємодії вхідного і модулюючого коливання у фазовому модуляторі (рис. 1) на його виході формується такий багаточастотний сигнал:

$$\dot{U}_{\text{вих}}(t) = \exp\{j(2\pi f_0 t + M_\varphi \sin(2\pi F_M t + \varphi_M) + \varphi_0)\} \text{ для } |t| \leq \frac{\tau_i}{2}, \quad (3)$$

де $M_\varphi = S_\varphi U_M$ – індекс фазової модуляції;

$S_\varphi = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi}$ – крутизна фазової модуляційної характеристики.

Для спрощення подальших розрахунків покладемо в (3) $\varphi_0 = \varphi_M = 0$.

Розклавши (3) в ряд за функціями Бесселя першого роду $I_n(M_\varphi)$ n -порядку від дійсного аргументу M_φ і врахувавши, що [7]

$$\exp(\pm jz \sin t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} I_n(z) \exp(\pm jnt), \text{ а } I_{-n}(z) = (-1)^n I_n(z), \quad (4)$$

вираз (3) запишемо в такому вигляді:

$$\dot{U}_{\text{вих}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(M_\varphi) \exp\{j2\pi(f_0 t + nF_M t)\}, \text{ якщо } |t| \leq \frac{\tau_i}{2}. \quad (5)$$

Вираз (5) описує БЧ АМ сигнал, що складається із N парціальних АМ радіоімпульсів, рознесених між собою за частотою на F_M , кожен із яких за фазочасовою структурою ідентичний вхідному АМ радіоімпульсу [16]. Якісно частотно-часову структуру сформованого сигналу наведено на рис. 2.

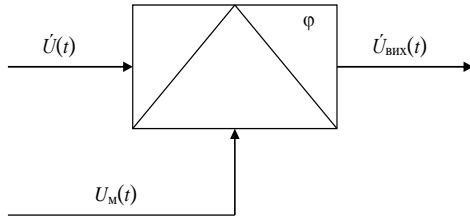


Рис. 1. Структурна схема фазового модулятора

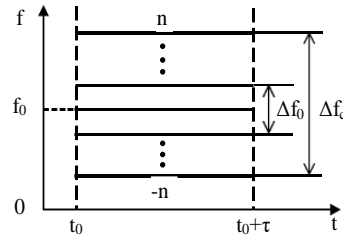


Рис. 2. Частотно-часова структурна БЧ АМ сигналу

Максимальна ширина спектра такого сигналу теоретично не обмежена, а практично визначається інерційністю та смугою пропускання фазових модуляторів, вона може досягати однієї октави [13]. Кількість парціальних радіоімпульсів, що формується фазовим модулятором, визначається межами зміни фази, тобто індексом фазової модуляції $M_\varphi = S_\varphi U_M$. Кількість парціальних радіоімпульсів, що формуються шляхом фазової модуляції визначається виразом [13, 16]

$$N = 2(M_\varphi + \sqrt{M_\varphi}) + 1. \tag{6}$$

З урахуванням викладеного вище загальний вираз, що визначає ширину спектра сформованого БЧ АМ сигналу для різноманітних параметрів модуляції можна записати в такому вигляді:

$$\Delta f_c = (N - 1)F_M + \Delta f_0, \tag{7}$$

де $\Delta f_0 = \frac{1}{\tau_i}$ – ширина спектра вихідного АМ радіоімпульсу.

Відповідність сигналу вимогам, що висуваються, оцінюємо за одномірними та двомірними кореляційними функціями, які найбільш повно відображають його потенційні можливості й інформативність [13, 16]. Тому доцільно отримати математичні вирази, що описують одномірну та двомірну кореляційні функції, справедливі для довільних параметрів його модуляції.

Нормовану комплексну обвідну двомірної кореляційної функції довільного сигналу опишемо як [7]

$$\hat{R}(\tau, F_d) = \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}(t) \dot{U}^*(t - \tau) \exp(j2\pi F_d t) dt, \tag{8}$$

де F_d – частота Доплера.

Підставивши вираз для комплексної обвідної БЧ АМ сигналу $\dot{U}(t)$ (5) одиничної амплітуди у вираз (8), знайдемо, що для $\tau \geq 0$:

$$\begin{aligned} \dot{R}(\tau, F_D) = & \frac{1}{2E} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(M_\varphi) \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \times \\ & \times \int_{-\frac{\tau_i}{2} + \tau}^{\frac{\tau_i}{2}} \exp\{j2\pi(f_0\tau + F_D t + (n-m)F_M t + mF_M\tau)\} dt, \end{aligned} \quad (9)$$

де $E = \frac{1}{2} \int_{-\frac{\tau_i}{2}}^{\frac{\tau_i}{2}} |\dot{U}(t)|^2 dt = \frac{\tau_i}{2}$ – енергія БЧ АМ сигналу одиничної амплітуди.

Інтеграл (9) виражається через функцію виду *sinc* (x), оскільки показник експоненти містить *t* у першому ступені. Аналогічно формулі (9) запишемо вираз для $\dot{R}(\tau, F_D)$ у разі $\tau \leq 0$. При цьому підінтегральний вираз не змінюється, а межі інтегрування стають $-\frac{\tau_i}{2}$ та $\frac{\tau_i}{2} + \tau$.

Об'єднавши результати рішень для $\tau \geq 0$ та $\tau \leq 0$, отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{R}(\tau, F_D) = & [1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}] \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(M_\varphi) \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \operatorname{sinc} \left\{ \pi [F_D \tau_i + (n-m)F_M \tau_i \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right)] \right\} \\ & \times \exp\{j[2\pi f_0 + \pi F_D + \pi(n+m)F_M]\tau\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Відповідно до (10), якщо $F_D = 0$, отримаємо вираз для одномірної кореляційної функції БЧ АМ сигналу:

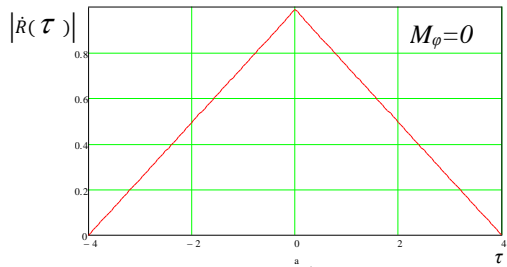
$$\begin{aligned} \dot{R}(\tau) = & [1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}] \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(M_\varphi) \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m(M_\varphi) \operatorname{sinc} \left\{ \pi [(n-m)F_M \tau_i \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_i}\right)] \right\} \times \\ & \times \exp\{j[2\pi f_0 + \pi(n+m)F_M]\tau\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Отримані вирази (10) та (11) описують двомірну (з урахуванням частоти Доплера) й одномірну кореляційні функції БЧ АМ сигналів і дозволяють аналізувати їх кореляційні властивості в разі довільних параметрів їх модуляції.

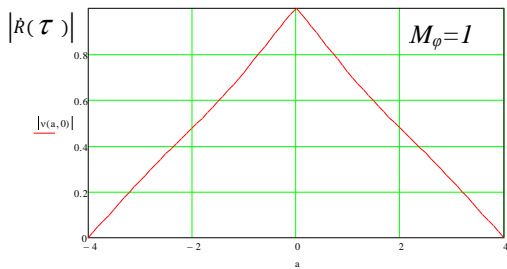
Аналіз залежності одномірної кореляційної функцій від параметрів модуляції БЧ АМ сигналу. Ширина головної пелюстки та рівень бокових пелюсток одномірної кореляційної функції БЧ АМ сигналу визначають роздільну здатність за дальністю, точність і однозначність виміру дальності, здатність радіолокаційної станції (РЛС) виділяти слабкі сигнали на фоні інтенсивних відбиттів.

Аналіз виразів для одномірної кореляційної функції БЧ АМ сигналу (11) показує, що вона становить собою суперпозицію функцій виду *sinc* (x). Вид одномірної кореляційної функції залежить від величини індексу фазової модуляції M_φ і відносної частоти гармонічної модуляції $Q = \frac{F_M}{\Delta f_0}$.

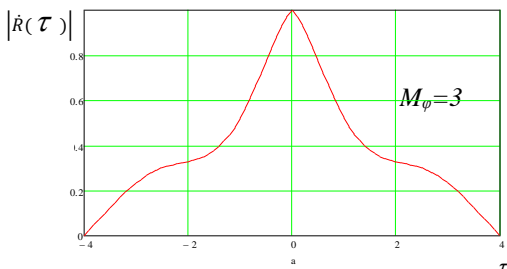
На рис. 3–4 наведено обвідні одномірних кореляційних функцій БЧ АМ сигналу $|\dot{R}(\tau)|$, розраховані за формулою (11), для $Q=1$ і $Q=2$ відповідно за різних значень M_φ . На рис. 5 зображено кореляційні функції БЧ АМ сигналів $|\dot{R}(\tau)|$ для $M_\varphi = 3$ рад, а на рис. 6 – для $M_\varphi = 7$ рад у разі $Q = 2, 1$ і $0,5$ відповідно, якщо $\tau_i = 4$ мс.



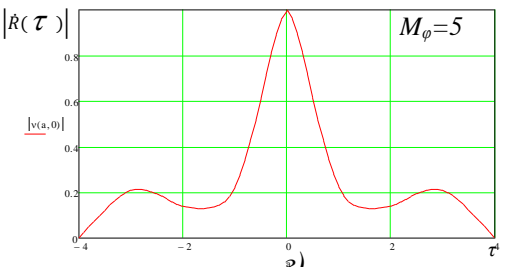
a)



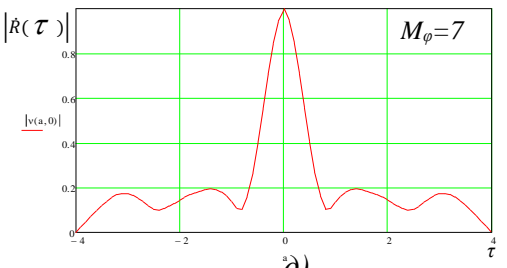
б)



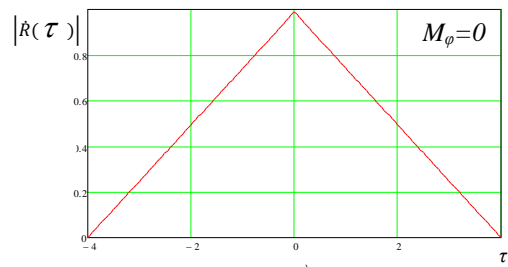
в)



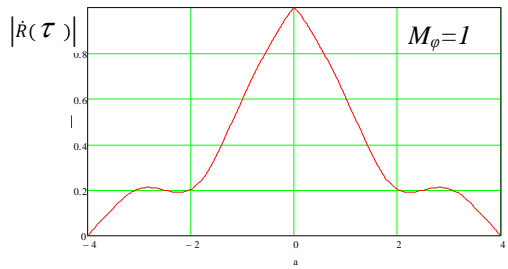
г)



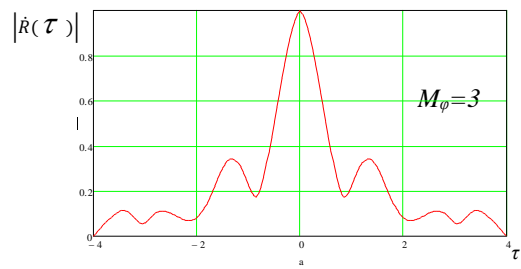
д)



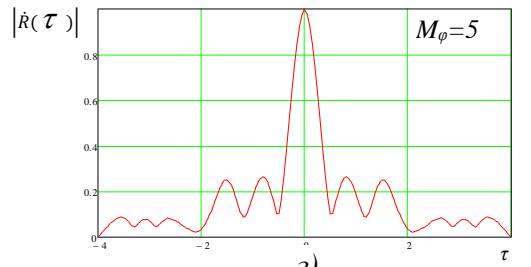
a)



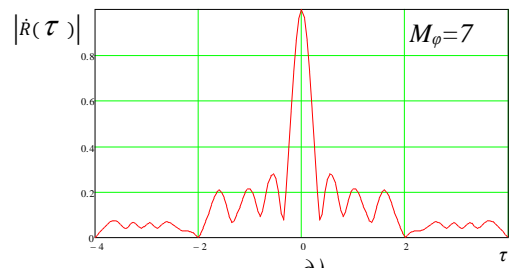
б)



в)



г)



д)

Рис. 3. Одномірною кореляційною функцією БЧ АМ сигналів для $Q = 1$

Рис. 4. Одномірною кореляційною функцією БЧ АМ сигналів для $Q = 2$

Проаналізуємо характер зміни обвідної одномірної кореляційної функції $|Ṙ(τ)|$ у разі зміни індексу модуляції $M_φ$ для випадку, коли $Q = 1$. Із залежностей, наведених на рис. 3,

видно, що збільшення індексу модуляції M_φ призводить до збільшення кількості бокових пелюсток на осі τ і до перерозподілу їх амплітуд. Ширина головного піку одномірної кореляційної функції звужується, оскільки зі збільшенням M_φ розширюється спектр БЧ АМ сигналу. Ширина нормованого головного максимуму кореляційної функції на рівні 0,5 визначається виразом

$$\Delta\tau_n = \frac{\Delta f_0}{\Delta f_c} = \Delta f_0 / ((N - 1)F_M + \Delta f_0). \quad (12)$$

Залежність $\Delta\tau_n$ від M_φ , розрахована за формулою (12) для $Q = 1$ ($F_M = \Delta f_0$), позначена на рис. 7 суцільною лінією. Штриховою лінією показана залежність $\Delta\tau_n$ від M_φ , побудована за результатами оброблення одномірних кореляційних функцій БЧ АМ сигналу для $Q = 1$, а штрихпунктирною лінією – для $Q = 2$.

Залежності мають однаковий характер, але кількісно не збігаються, оскільки знаменник виразу (12) визначає ефективну ширину спектра БЧ АМ сигналу на рівні 1% від амплітуди центрального парціального АМ радіоімпульсу за відсутності гармонічної модуляції. Залежність $\Delta\tau_n$ від M_φ для $Q = 1$, побудована за результатами оброблення одномірних кореляційних функцій БЧ АМ сигналу, у разі малих індексів фазової модуляції має значні відмінності, а в результаті збільшення індексу фазової модуляції наближається до розрахованих значень за формулою (12). Пояснити це явище можна домінуванням у спектрі БЧ АМ сигналу складових, розташованих в околі центральної складової спектра, за невеликих значень M_φ .

Для $Q = 2$ залежність $\Delta\tau_n$ від M_φ за параметрами наближається до залежності $\Delta\tau_n$, розрахованої за формулою (12). Це явище обумовлено збільшенням ефективної ширини спектра БЧ АМ сигналу близько удвічі для $Q = 2$ відносно ширини спектра для $Q = 1$.

Збільшення параметра Q за рахунок зростання F_M , якщо $\Delta f_0 = \text{const}$, призводить до виникнення на осі τ додаткових максимумів одномірної кореляційної функції, величина яких становить 20%–30% від величини центрального піку. При цьому ширина головного піку зменшується, стає залежною від Q і визначається за таким виразом:

$$\Delta\tau = 1 / ((M_\varphi + \sqrt{M_\varphi} + 1)Q + 1) \Delta f_0. \quad (13)$$

У разі великих значень параметра Q шириною спектра парціального радіоімпульсу в (13) можна знехтувати і визначати ширину центрального піку одномірної кореляційної функції, використовуючи вираз

$$\Delta\tau = 1 / ((M_\varphi + \sqrt{M_\varphi} + 1)F_M). \quad (14)$$

У разі збільшення індексу модуляції M_φ , як і для випадку, коли $Q = 1$, спостерігається збільшення кількості й амплітуди бічних максимумів на осі τ одномірної кореляційної функції.

Аналіз залежностей, наведених на рис. 5–6 показує, що незначне перекриття спектрів парціальних радіоімпульсів за $Q < 2$ призводить до зменшення кількості й амплітуд бокових пелюсток одномірної кореляційної функції, причому зі збільшенням індексу

модуляції M_φ ця залежність стає менш явною (рис. 6). Подальше зменшення Q спричиняє зниження рівня бокових пелюсток та їх зникнення в околі центрального піку одномірної кореляційної функції (рис. 5в та рис. 6в).

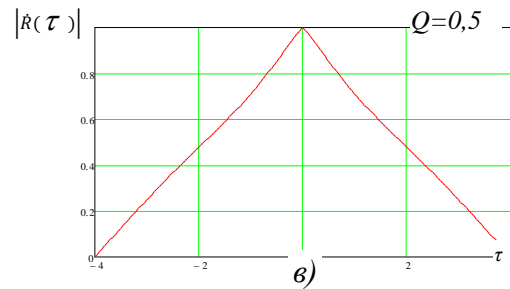
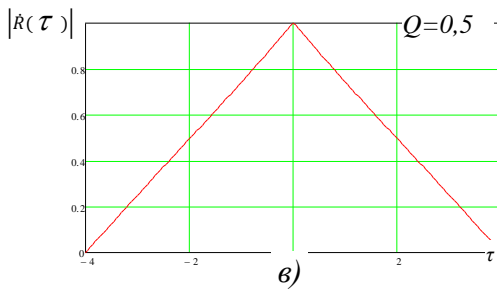
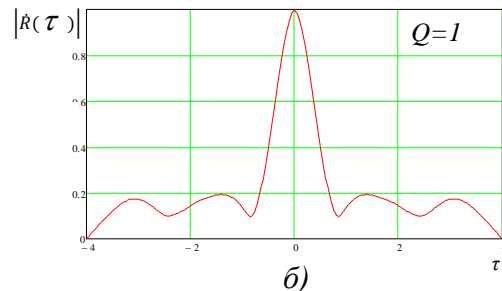
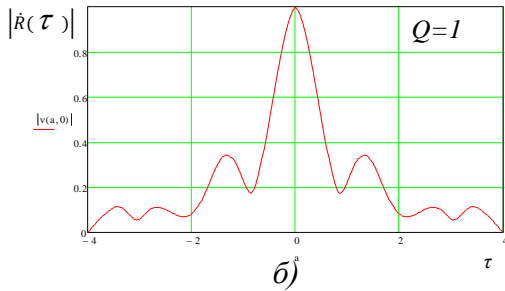
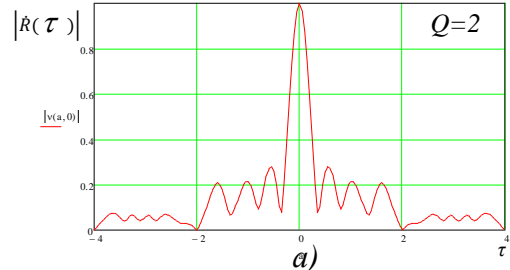
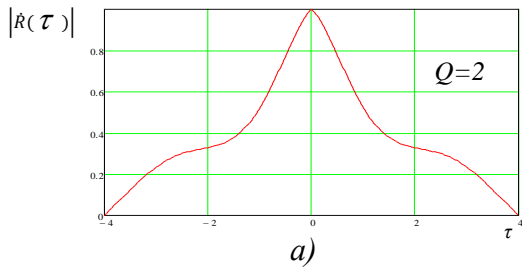


Рис. 5. Одномірна кореляційна функція БЧ АМ сигналів для $M_\varphi = 3$

Рис. 6. Одномірна кореляційна функція БЧ АМ сигналів для $M_\varphi = 7$

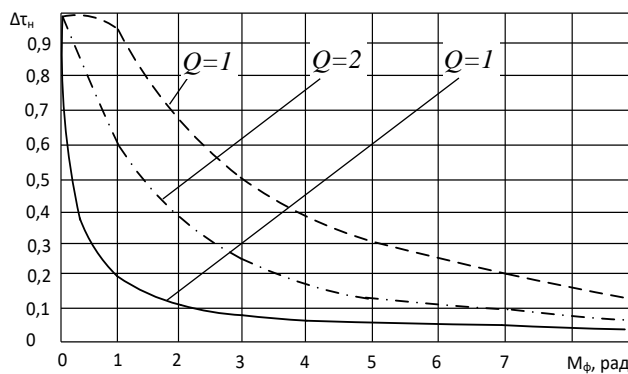


Рис. 7. Залежність $\Delta\tau_n$ від величини індексу фазової модуляції M_φ

Одночасно зі зменшенням Q спостерігається розширення центрального піку одномірної кореляційної функції $\Delta\tau$, а за значного зменшення Q він прагне до свого граничного значення – ширини головного піку $\Delta\tau_0$ одномірної кореляційної функції парціального АМ радіоімпульсу. Цю залежність у загальному вигляді можливо описати виразом (14), а в разі $Q \ll 1$ – з достовірною точністю розрахувати за формулою

$$\Delta\tau = 1/\Delta f_0. \quad (15)$$

Отже, вид обвідної одномірної кореляційної функції $|\dot{R}(\tau)|$ визначається індексом фазової модуляції M_φ і величиною параметра Q . Індекс фазової модуляції M_φ в основному впливає на кількість бічних максимумів обвідної одномірної кореляційної функції $|\dot{R}(\tau)|$ і їх амплітуду. Відносна частота гармонічної модуляції Q окреслює характер порізаності обвідної одномірної кореляційної функції БЧ АМ сигналу, а разом із M_φ – ширину головного піку одномірної кореляційної функції.

Аналіз залежності двомірної кореляційної функцій від параметрів модуляції БЧ АМ сигналу. Для аналізу розділення за дальністю і швидкістю БЧ АМ сигналу розглянемо його двомірні кореляційні функції (ДКФ) для різних значень параметра Q і сталого значення M_φ . Для цього скористаємося модулем виразу (10), який визначає поверхню ДКФ (функцію невизначеності). На рис. 8 зображено центральні частини функцій невизначеності БЧ АМ сигналів та їх проєкції на осях τ , F_d для $M_\varphi = 7$ рад і $\tau_i = 4$ мс.

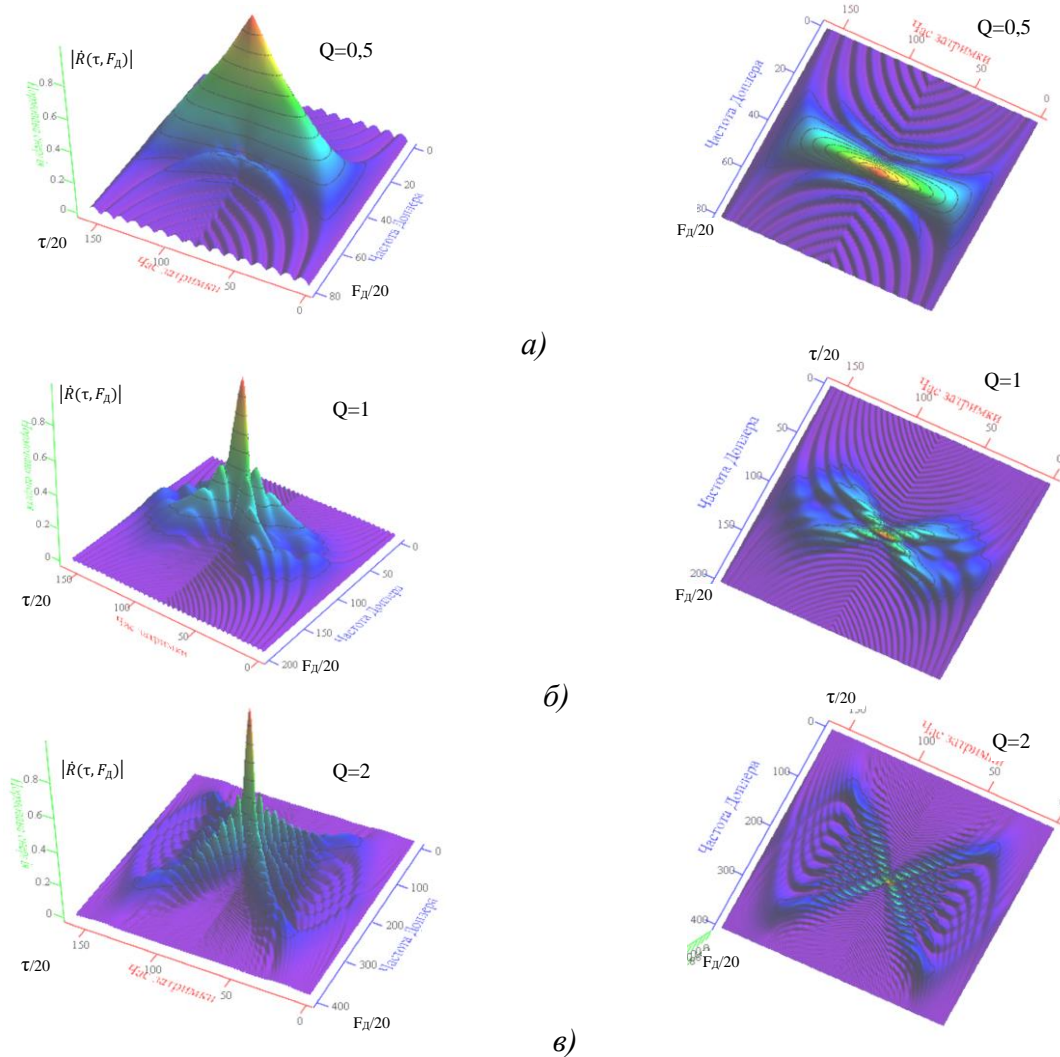


Рис. 8. Двомірні кореляційні функції БЧ АМ сигналів та їх проєкції для $M_\varphi = 7$ рад

Аналіз рис. 8 показує, що функція невизначеності БЧ АМ сигналу є багатопіковою в площині F_D і τ . Зі збільшенням відносної частоти гармонічної модуляції $Q = \frac{F_M}{\Delta f_0}$ спостерігається зростання кількості додаткових піків на ній. Загальна кількість додаткових піків на площині $\Delta\tau = (-\tau_i \dots \tau_i)$ і $F_D = (-\Delta f_c \dots \Delta f_c)$ для сталого значення M_ϕ визначається тривалістю початкового сигналу τ_i , а відповідно, і шириною його спектра Δf_0 , частотою модулюючої напруги F_M , ефективною шириною спектра Δf_c та співвідношеннями останніх.

Збільшення параметра Q призводить до появи симетричних відносно осей τ та F_D гребнів на поверхні ДКФ. Переріз функції невизначеності вертикальною площиною $\tau = 0$ є функцією $\text{sinc}(x)$, що цілком визначається прямокутною обвідною та тривалістю початкового сигналу τ_i .

Збільшення індексу модуляції M_ϕ зумовлює появу додаткових максимумів функції невизначеності та звуженню центрального піку в часі.

Зменшення відносної частоти гармонічної модуляції $Q < 1$ призводить до розширення центрального піку функції невизначеності. Провали між піками гребня зникають, він набуває «ножевидного характеру», наближаючись до ДКФ одиночного радіоімпульсу.

Щодо виміру дальності та швидкості об'єктів інтерес викликає центральна частина функції невизначеності – основний пік.

Аналіз рис. 8 свідчить, що зміна параметра Q не спричиняє повороту області сильної кореляції центрального піку, тобто області, де $|\dot{R}(\tau, F_D)| \geq 0,5$.

Цілком природно, що роздільна здатність за дальністю БЧ АМ сигналу визначається шириною його спектра $\Delta f_c = (N - 1)F_M + \Delta f_0$, а роздільна здатність за швидкістю – тривалістю імпульсу τ_i . Наявність додаткових піків на площині (τ, F_D) може призвести до неоднозначності в обчисленні дальності та швидкості цілей. Усунути цей недолік можливо за рахунок вибору параметрів модуляції БЧ АМ сигналу, виходячи із функціонального призначення РЛС і апіорних даних про можливі значення $F_{D \max}$.

У загальному вигляді діаграму невизначеності БЧ АМ сигналу, розраховану на рівні $|\dot{R}(\tau, F_D)| = 0,1$, наведено на рис. 9.

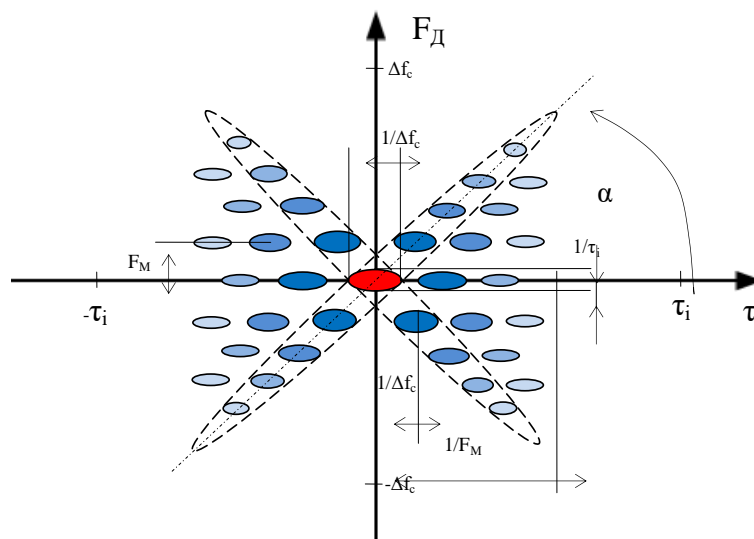


Рис. 9. Діаграма невизначеності БЧ АМ сигналу

Із рис. 9 випливає, що діаграма невизначеності є симетричною, багатопіковою структурою із явно вираженими гребнями та центральним піком, ширина якого на рівні $|\dot{R}(\tau, F_d)| = 0,5$ за часом обернено пропорційна ширині спектра Δf_c , а за частотою Доплера – обернено пропорційна тривалості початкового радіоімпульсу τ_i . Кут нахилу гребнів α відносно осі τ для $Q \geq 1$ та $M_\varphi \geq 3$ із достатньою точністю визначаємо як

$$\alpha = \arctg (F_M / \Delta f_c). \quad (16)$$

Взаємне розташування додаткових піків на площині τ, F_d та їх віддаленість від осей τ, F_d знаходимо за частотою модулюючої напруги F_M і шириною спектра БЧ АМ сигналу Δf_c . Слід зауважити, що для розрахунку параметрів діаграми невизначеності як Δf_c необхідно застосовувати її значення, отримані за результатами оброблення одномірних кореляційних функцій БЧ АМ сигналу в ході обчислення $\Delta \tau_n$, наведені на рис. 7, оскільки $\Delta f_c = \Delta f_0 / \Delta \tau_n$.

Отже, проведений аналіз показав, що поверхня ДКФ є багатопіковою. Кількість бічних максимумів, сумірних за величиною з основним, і їх взаємне розташування на поверхні визначається частотою модулюючого коливання F_M і відносною частотою гармонічної модуляції $Q = \frac{F_M}{\Delta f_0}$. Кут нахилу гребня поверхні невизначеності $|\dot{R}(\tau, F_d)|$ відносно осі τ залежить від параметрів Δf_c та F_M .

Висновки. БЧ АМ сигнали можна сформулювати шляхом модуляції високочастотних АМ сигналів гармонічним коливанням проміжної частоти у фазових модуляторах одноканального пристрою.

На основі використання апробованого апарату математичного аналізу та теорії бесселевих функцій отримано аналітичний вираз для розрахунку одномірної та двомірної кореляційних функцій БЧ АМ сигналу та побудовано графіки їх обвідних для вибраних параметрів модуляції. Проведений всебічний аналіз одномірних та ДКФ від параметрів модуляції показав принципову можливість застосування БЧ АМ сигналу в системах зв'язку та радіолокації для підвищення прихованості, інформативності та адаптації роботи систем до наявної радіоелектронної обстановки.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Костенко П. Ю., Слободянюк В. В., Барсуков А. Н. Скрытность аналитических хаотических сигналов // Радиотехника и системы связи. 2017. Т. 60, № 3. С. 166–175. <https://doi.org/10.3103/S0735272717030050>
2. Кувшинов О. В., Вознюк Р. М. Оцінка структурної скритності широкосмугових сигналів // Зб. наук. праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2011. № 1. С. 106–111.
3. Захарченко Н. В., Горохов В. В., Корчинський В. В. Прихована передача в системах зв'язку з хаотичними сигналами // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2013. № 3. С. 41–45.
4. Корчинський В. В. Оцінка структурної скритності сигнальних конструкцій на основі хаотичних сигналів у системах передачі конфіденційної інформації // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2012. № 1. С. 11–16.

5. Метод підвищення скритності систем передачі інформації на основі модуляції з ортогональним частотним розділенням і мультиплексуванням хаотичних піднесучих / К. С. Васюта, У. Р. Збежховська, В. В. Слободянюк та ін. // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. Харків, 2021. № 3. С. 79–93. <https://doi.org/10.32620/reks.2021.3.07>
6. Кореляційний метод обробки складеного хаотичного сигналу / К. С. Васюта, О. Л. Кащисин, О. П. Ковальчук, О. Д. Підлісний // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. № 1 (42). С. 104–109.
7. Теория и техника генерирования, излучения и приема радиолокационных сигналов / Н. Г. Батулин, В. И. Гомозов, В. Ф. Екимов и др. ; под ред. Ю. Н. Седышева. Харьков : ВИРТА, 1986. 650 с.
8. Дзігора О. М., Таршин В. А., Залевський Г. С. Цифроаналоговий метод формування сигналів із адаптивно змінюваними параметрами // *Системи обробки інформації*. 2020. Вип. 2 (161). С. 7–18.
9. Пошук та локалізація радіозакладних пристроїв : навч. посіб. / В. О. Хорошко, О. Д. Азаров, Г. О. Максименко, Ю. Є. Яремчук. Вінниця : ВНТУ, 2007. 333 с.
10. Нагорнюк О. А., Авсієвич Р. О. Метод розпізнавання виду модуляції радіосигналів космічних систем зв'язку в умовах апіорної невизначеності // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. № 2 (47). С. 19–24.
11. Sabbar M. B., Rasool A. H. Automatic Modulation Classifier: Review // *Iraqi Journal of Information and Communication Technology*. 2020. № 3 (4). P. 11–32. <https://doi.org/10.31987/ijict.3.4.111>
12. Технічний аналіз сигналів : навч. посіб. / В. М. Котенко, В. Д. Меленський, Ю. І. Запорожченко, Ю. О. Заєць. Житомир : ЖВІ, 2018. 412 с.
13. Гомозов В. И., Николаев А. И. Об одном из научных наследий Я. Д. Ширмана во втором поколении // *Прикладная радиоэлектроника*. 2009. Т. 8, № 4. С. 443–460.
14. Котенко В. Н., Веселов В. Ф., Гомозов В. И. Экспериментальное исследование устройств формирования и обработки МЧ ЛЧМ сигналов // *НТ тематический сборник*. Харьков : ВИРТА, 1987. Ч. 2. С. 132–138.
15. Гомозов В. И. Теория и техника формирования сложных СВЧ сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем. Харьков, 2002. 398 с.
16. Аналіз спектрів багаточастотних амплітудно-модульованих радіосигналів / В. М. Котенко, В. В. Дзюбенко, Ю. О. Кудряшов, О. В. Самонюк // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць*. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 26 (1). С. 30–39. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.03>

Стаття надійшла до редакції 23.02.2026.

Прийнято до друку 25.03.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Kostenko, P. Yu., Slobodyanyuk, V. V., & Barsukov, A. N. (2017). Skrytnost analiticheskikh haoticheskikh signalov [Stealthiness of Analytical Chaotic Signals]. *Radioelektronika ta systemy*

- svyazku [Radioelectronics and Communications Systems]*, 60, 3, 166–175. <https://doi.org/10.3103/S0735272717030050> [in Russian].
2. Kuvshynov, O. V., & Vozniuk, R. M. (2011). Otsinka strukturnoi skrytnosti shyrokosmuhovykh syhnaliv [Estimation of the Structural Secrecy of Wide-Angle Signals]. *Zb. nauk. prats VITI NTUU "KPI" [Collection of Scientific Works VITI NTUU "KPI"]*, 1, 106–111 [in Ukrainian].
3. Zakharchenko, N. V., Horokhov, V. V., & Korchynskiy, V. V. (2013). Prykhovana peredacha v systemakh svyazku z khaotychnymy syhnalamy [Transmission in Systems Linked to Chaotic Signals is Use]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh [Measuring and computing technology in technological processes]*, 3, 41–45 [in Ukrainian].
4. Korchynskiy, V. V. (2012). Otsinka strukturnoi skrytnosti syhnalnykh konstruktsii na osnovi khaotychnykh syhnaliv u systemakh peredachi konfidentsiinoi informatsii [Assessment of the Structural Secrecy of Signal Structures Based on Chaotic Signals in Systems for Transmitting Confidential Information]. *Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova [Scientific Works ONAZ by O. S. Popova]*, 1, 11–16 [in Ukrainian].
5. Vasiuta, K. S., Zbezhkhovska, U. R., & Slobodianiuk, V. V. et al. (2021). Metod pidvyshchennia skrytnosti system peredachi informatsii na osnovi moduliatsii z ortohonalnym chastotnym rozdilenniam i multypleksuvanniam khaotychnykh pidnesuchykh [Method for Increasing the Confidentiality of Information Transmission Systems Based on Modulation with Orthogonal Frequency Divisions and Multiplexing of Chaotic Carriers]. *Radioelektronni i kompiuterni systemy [Radioelectronic and Computer Systems]*, 3, 79–93. <https://doi.org/10.32620/reks.2021.3.07> [in Ukrainian].
6. Vasiuta, K. S., Kashchyshyn, O. L., Kovalchuk, O. P., & Pidlisnyi, O. D. (2021). Koreliatsiynyi metod obrobky skladenoho khaotychnoho syhnalu [Correlative Method of Processing a Folded Chaotic Signal]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Military Forces of Ukraine]*, 1 (42), 104–109 [in Ukrainian].
7. Baturin, N. H., Gomozov, V. I., Yekimov, V. F. et al. (1986). *Teoriya i tehnika generirovaniya, izlucheniya i priema radiolokacionnykh signalov [Theory and Technology of Generation, Emission and Reception of Radar Signals]* [in Russian].
8. Dzihora, O. M., Tarshyn, V. A., & Zalevskiy, H. S. (2020). Tsyfroanalohovyi metod formuvannia syhnaliv iz adaptivno zminiuvanymy parametry [Digital-Analog Method of Signal Formation with Adaptively Variable Parameters]. *Systemy obrobky informatsii [Information Processing Systems]*, 2 (161), 7–18 [in Ukrainian].
9. Khoroshko, V. O., Azarov, O. D., Maksymenko, H. O., & Yaremchuk, Yu. Ye. (2007). *Poshuk ta lokalizatsiia radiozakladnykh prystroiv [Search and Localization of Radio Embedded Devices]* [in Ukrainian].
10. Nahorniuk, O. A., & Avsiievykh, R. O. (2023). Metod rozpoznavannia vydu moduliatsii radiosyhnaliv kosmichnykh system svyazku v umovakh apriornoj nevyznachenosti [Method of Recognizing the Type Of Modulation of Radio Signals of Space Communication Systems under Conditions of a Priori Uncertainty]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony [Modern Information Technologies in the Field of Security and Defense]*, 2 (47), 19–24 [in Ukrainian].

11. Sabbar, M. B., & Rasool, A. H. (2020). Automatic Modulation Classifier: Review. *Iraqi Journal of Information and Communication Technology*, 3 (4), 11–32. <https://doi.org/10.31987/ijict.3.4.111>
12. Kotenko, V. M., Melenskyi, V. D., Zaporozhchenko, Yu. I., & Zaiets, Yu. O. (2018). Tekhnichniy analiz syhnaliv [Technical Analysis of Signals] [in Ukrainian].
13. Gomofov, V. I., & Nikolaev, A. I. (2009). Ob odnom iz nauchnyh nasledij Ya. D. Shirmana vo vtorom pokolenii [On one of the scientific legacies of Ya. D. Shirman in the second generation]. *Prikladnaya radioelektronika [Applied Radio Electronics]*, 8, 4, 443–460 [in Russian].
14. Kotenko, V. N., Veselov, V. F., & Gomofov, V. I. (1987). Eksperimentalnoe issledovanie ustrojstv formirovaniya i obrabotki MCh LChM signalov [Experimental study of devices for the formation and processing of MP LFM signals]. *NT tematicheskij sbornik [Scientific and Technical Thematic Collection]*, 2, 132–138 [in Russian].
15. Gomofov, V. I. (2002). *Teoriya i tehnika formirovaniya slozhnyh SVCh signalov s vysokoy skorostyu uglovoj modulyacii dlya radiotekhnicheskikh sistem [Theory and Technology of Forming Complex Microwave Signals with a High Angular Modulation Rate for Radio Engineering Systems]* [in Russian].
16. Kotenko, V. M., Dziubenko, V. V., Kudriashov, Yu. O., & Samoniuk, O. V. (2024). Analiz spektriv bahatochastotnykh amplitudno-modulovanykh radiosyhnaliv [Analysis of Spectra of Multi-Frequency Amplitude Modulated Radio Signals]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 26 (I), 30–39. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.03> Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].

V. M. Kotenko, V. D. Prokopovych, O. V. Samoniuk, Yu. V. Synytskyi

RESEARCH OF AUTOCORRELATION FUNCTIONS OF MULTI-FREQUENCY AMPLITUDE MODULATED RADIO SIGNALS

The article presents the results of the study of one-dimensional and two-dimensional correlation functions of multi-frequency radio signals formed by phase modulation of a pulsed amplitude-modulated radio signal of ultra-high frequency by harmonic oscillations of the intermediate frequency in the phase modulator. Based on the obtained expressions for one-dimensional and two-dimensional correlation functions of the complex envelope of a multi-frequency amplitude-modulated signal at the output of the phase modulator, an analysis of their structure depending on the modulation parameters is carried out. It is established that the type of envelope of the one-dimensional correlation function is determined by the phase modulation index and the value of the relative frequency of the harmonic modulation, namely, the phase modulation index determines the number of side maxima of the envelope and their amplitude, and the relative frequency of the harmonic modulation determines the nature of the cut of the envelope. The width of the main peak of the one-dimensional correlation function is determined by the effective width of the spectrum of the multi-frequency amplitude-modulated signal, which depends on the phase modulation index and the frequency of the modulating voltage. The surface

of the two-dimensional correlation function is multi-peaked. The number of side maxima on the surface area, commensurate in magnitude with the main one, is determined by the frequency of the modulating oscillation and the duration of the radio pulse. The overlap in frequency of the spectra of partial radio pulses leads to the appearance of additional ridges parallel to the main one on the frequency-time plane of the two-dimensional correlation function.

By the nature of the change in the parameters of the correlation functions from the modulation parameters, the multi-frequency amplitude-modulated signal can be attributed to the family of noise-like signals. The formation of multi-frequency amplitude-modulated signals is carried out by single-channel devices, and strict restrictions on linearity are not required for the power amplification stages. The practical application of the studied signals provides an opportunity to potentially increase the energy and structural stealth of radio communication and radar systems, to adapt the radar operating modes to the radio-electronic environment.

Keywords: *amplitude modulation; phase modulation; multi-frequency radio signal; correlation functions; energy and structural secrecy.*

І. В. Зімчук, канд. техн. наук, доц.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0009-0003-9372-5720>

Т. М. Шапар
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0009-0008-0497-7675>

СИНТЕЗ НЕРЕКУРСИВНИХ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Ключовою вимогою, яка висувається до систем навігації, є висока точність та надійність визначення навігаційних даних. Основу сучасних навігаційних комплексів безпілотних літальних апаратів становлять інерціальні навігаційні системи, які відповідають цілому комплексу важливих показників, таких як: висока інформативність, абсолютна автономність, захищеність та стійкість. У безпілотних літальних апаратах малої маси набули широкого застосування безплатформні інерціальні навігаційні системи, які реалізуються на базі акселерометрів та гіроскопів, виготовлених за технологією мікроелектромеханічних систем. Низька точність таких сенсорів зумовлює застосування в системах навігації додаткових етапів оброблення навігаційних вимірювань, які, як правило, реалізуються із застосуванням рекурсивних цифрових фільтрів, що працюють за принципом корекції передбачення. Основною проблемою реалізації таких фільтрів є можлива нестійкість. У зв'язку із цим статтю присвячено синтезу та дослідженню нерекурсивних цифрових фільтрів для безплатформних інерціальних систем навігації безпілотних літальних апаратів. Викладено методика, за якою визначають структуру та коефіцієнти згладжування нерекурсивних цифрових фільтрів. Її подано як розвиток теоретичних положень структурного синтезу рекурсивних цифрових фільтрів, які функціонують за принципом корекції передбачення. Згладжувальні фільтри розглянуто як динамічні системи, описані дискретними передавальними функціями. Нерекурсивну структуру цифрових фільтрів досягнуто шляхом відповідних перетворювань структури рекурсивних фільтрів за умови примусового усунення операції розрахунку передбачення. Алгоритми, які реалізують обчислювальну процедуру фільтрації, є різницеvими рівняннями, коефіцієнти яких відповідають відлікам імпульсної характеристики фільтра. У роботі наведено приклад синтезу нерекурсивного алгоритму фільтрації, працездатність та ефективність якого досліджено шляхом комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: цифровий фільтр; оцінка; вимірювання; безпілотний літальний апарат; акселерометр; система навігації; алгоритм фільтрації; нерекурсивний фільтр.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Одним із основних режимів функціонування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) є політ за завчасно заданою

траєкторією. Для керування таким рухом необхідно мати актуальні навігаційні дані літального апарата, а саме: координати центра мас, напрямок та швидкість пересування, орієнтацію в просторі [1]. Стандартним рішенням їх отримання є використання інтегрованих навігаційних систем, які поєднують інерціальну та супутникову складові. Обидві системи працюють одночасно і, як правило, комплексуються [2, 3].

Для БпЛА військового призначення важливого значення набуває можливість здійснювати політ в автономному режимі. За відсутності сигналів глобальних супутникових навігаційних систем (СНС) та зв'язку з наземною станцією управління він повинен перейти в автономний режим польоту, який реалізується засобами інерціальної навігаційної системи (ІНС). При цьому критичного значення набуває точність навігаційної інформації. Значне відхилення від заданої траєкторії польоту може призвести до невиконання бойового завдання або втрати БпЛА [1].

Автономність та висока інформативність ІНС обґрунтовують її належність до універсальних систем із визначення як траєкторних рухів БпЛА (координат та швидкості польоту), так і кутових координат (кутів крену, тангажа й курсу) та інших параметрів, наприклад, прискорень, кутових швидкостей тощо [4]. У БпЛА малої маси широкого застосування набули безплатформні ІНС, які реалізуються на базі мікроелектромеханічних акселерометрів та гіроскопів. Однак інерціальні датчики не вирізняються високою точністю через наявність у складі вимірювань низькочастотної та високочастотної складових, які являють собою нестабільність зміщення нуля й адитивний шум, спричинений особливостями конструкції та умовами функціонування. Для зменшення рівня перешкод, які приховують належну інформацію, використовують додаткові етапи перетворення та оброблення вихідних сигналів інерціальних датчиків [5–7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці для зниження рівня флуктуаційних шумів та похибок акселерометричних датчиків використовують алгоритми фільтрації [8, 9]. Класичним способом розв'язання задачі фільтрації є застосування фільтра Калмана [5, 7], який дозволяє отримати оцінку, оптимальну за критерієм – мінімум середньоквадратичної помилки оцінювання, за умови наявності апріорної інформації про математичну модель даних, які вимірюються, а також статистичні характеристики помилок вимірювань [8, 9]. Можливість застосування таких алгоритмів у навігаційних системах обумовлена тим, що є задачі, які можуть бути зведені до лінійних без помітних втрат у точності. Водночас унаслідок нелінійного характеру рівнянь, які описують динаміку вектора стану та вимірювань, є декілька модифікацій класичного фільтра Калмана, серед яких: розширений фільтр Калмана (Extended Kalman filter – EKF) [10, 11], сигма-точковий фільтр Калмана (Unscented Kalman filter – UKF) [12, 13] та фільтр Калмана частинок (Particle Kalman Filter – PKF) [14]. Різниця між згаданими алгоритмами полягає в методах лінеаризації нелінійних моделей.

Розглянуті алгоритми калманівського типу є досить універсальними щодо практичного застосування, однак характеризуються високою складністю. Кожна наступна модифікація фільтра вимагає значно більших обчислювальних потужностей. Саме тому їх застосування в системах, які реалізуються на мікроконтролерах, повинно бути виправдане. Крім того, має місце проблема їх практичної реалізації через абстрактну

форму опису, яка не відображає усіх деталей процесу [15].

Порівняно новим підходом до розв'язання задачі фільтрації параметрів орієнтації в ІНС є фільтр Маджвіка [9, 16], який обчислює єдину оцінку орієнтації на основі вимірювань акселерометра та гіроскопа. Його точність сумірна з точністю фільтра Калмана, однак на відміну від останнього він потребує менше обчислювальних ресурсів для своєї реалізації, а задача мінімізації помилок оцінювання в цьому фільтрі розв'язується застосуванням алгоритму градієнтного спуску, при цьому пошук мінімуму реалізується лише в одну його ітерацію. Для опису орієнтації об'єкта в просторі фільтр Маджвіка використовує кватерніони, що не є наочним для прямого розуміння користувачем. Крім того, алгоритм був спроектований під умови конкретної задачі, тому він не є універсальним.

Найпростіший варіант фільтра, здатний розв'язувати задачу фільтрації вимірювань в ІНС, – це комплементарний фільтр [16]. Його робота ґрунтується на змішуванні вимірювань акселерометра та гіроскопа у визначеній пропорції. Незважаючи на простоту реалізації цього алгоритму, точність вихідних значень фільтра нижча, ніж у розглянутих вище алгоритмів. Крім того, налаштування коефіцієнта згладжування комплементарного фільтра передбачено лише експериментальним шляхом.

У ході розроблення ефективних алгоритмів необхідно брати до уваги особливості умов розв'язання прикладних задач фільтрації. Зокрема, активно розвиваються методи поліноміальної фільтрації [17], у яких враховується той факт, що вимірювання навігаційних параметрів є одновимірним потоком даних. Для таких припущень у [15] викладено метод, що дозволяє синтезувати згладжувальні фільтри в разі скалярних моделей вхідних дій і дає можливість формувати алгоритми заданої структури, виходячи із забезпечення необхідної точності оцінювання в сталому режимі. Фільтри, синтезовані за викладеним методом, належать до класу рекурсивних цифрових фільтрів (РЦФ), які функціонують за принципом корекції передбачення. Характеристика такого фільтра описується диференціальним рівнянням n -го порядку, яке показує що значення вибірки на виході фільтра в поточний момент часу визначається лінійною комбінацією зважених вибірок у цей та минулі часові відтинки. У результаті побудови такої структури синтезується фільтр із характеристикою полюсно-нульового типу. Кількість полюсів та нулів (порядок фільтра) визначається кількістю елементів затримки.

Теоретично структура РЦФ має нескінченну пам'ять, і тому її вважають структурою фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою. Наявність у ній нулів та полюсів дозволяє реалізувати фільтр із крутим зрізом характеристики в поєднанні з малою шириною смуги пропускання за невеликої кількості елементів затримки (фільтр малої складності). Недоліком таких фільтрів є відсутність механізмів керування фазовою характеристикою (груповою затримкою) фільтра. Однак основною проблемою під час їх проектування є можлива нестійкість фільтра через наявність полюсів за межами області стійкості, що може стати причиною розбіжності процесу фільтрації.

Одним із способів подолання потенційної нестійкості є створення такого фільтра, характеристика якого має лише нулі, тобто в ньому використовуються лише множники з прямим зв'язком. Ці фільтри належать до класу нерекурсивних цифрових фільтрів

(НРЦФ), обмежена пам'ять яких регулюється кількістю елементів затримки. Їхніми основними перевагами є можливість отримання лінійної фазочастотної характеристики та абсолютна стійкість у разі нерекурсивної реалізації. Вказані особливості спонукають до синтезу саме нерекурсивних алгоритмів фільтрації та їх можливого застосування для фільтрації вимірювань датчиків орієнтації ІНС БпЛА.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення методики синтезу нерекурсивних алгоритмів поліноміальної фільтрації результатів вимірювань в ІНС БпЛА. Синтезовані алгоритми повинні відповідати вимогам заданого критерію якості фільтрації та мінімальної обчислювальної складності щодо своєї реалізації, що є надзвичайно актуальним у навігаційних системах малих БпЛА [2].

Виклад основного матеріалу

Дано. Рівняння стану та спостереження:

$$x(n) = \sum_{m=0}^N \frac{T^m}{m!} \Delta^m x(n-1);$$

$$g(n) = x(n) + f(n),$$
(1)

де x – істинне значення інформаційного параметра;

$\Delta^m x$ – кінцева різниця m -го порядку;

N – порядок моделі;

T – темп оброблення інформації;

$n = 0, 1, 2, \dots$ – нормований відносно інтервалу дискретизації дискретний час;

f – помилка вимірювання.

Знайти. Для дискретного процесу (1) синтезувати нерекурсивний фільтр, який формує оцінку $\hat{x}(n)$, оптимальну за критерієм – мінімум дисперсії помилок оцінювання:

$$P(n) = M[\varepsilon^2(n)] \rightarrow \min,$$
(2)

тут

$$\varepsilon(n) = x(n) - \hat{x}(n)$$

– помилка оцінювання.

Обмеження. Помилки вимірювань (шуми) є некорельованим білим гаусівським шумом:

$$M[x(n)f(n)] = 0, M[f(n)f(n-i)] = 0, i > 0,$$

$$R(n) = M[f^2(n)],$$
(3)

де M – символ математичного сподівання;

R – дисперсія адитивного шуму, значення якої вважається відомим.

Синтез нерекурсивних алгоритмів фільтрації. Поставлену задачу розв'язуємо шляхом розвитку теоретичних положень методики синтезу алгоритмів поліноміальної

фільтрації, яку викладено в [15]. Згідно з нею синтез алгоритмів фільтрації полягає в застосуванні таких рівнянь:

$$x_e(n) = [1 - A(z)]\hat{x}(n); \quad (4)$$

$$\tilde{u}(n) = g(n) - x_e(n); \quad (5)$$

$$\hat{x}(n) = \frac{B(z)}{A(z)}\tilde{u}(n), \quad (6)$$

де $x_e(n)$ – екстрапольоване значення інформаційного параметра;

$\tilde{u}(n)$ – нев'язка;

$$B(z) = \sum_{j=0}^l b_j z^{-j} \quad (7)$$

– чисельник передавальної функції розімкненої частини фільтра, який містить коефіцієнти згладжування, значення яких характеризують якість фільтрації;

$$A(z) = (1 - z^{-1})^v \left[1 + \sum_{i=1}^k a_i z^{-i} \right]$$

– знаменник передавальної функції розімкненої частини фільтра, який визначає порядок астатизму, розраховуємо його на підставі третьої форми умов інваріантності:

$$A(z)x(n) = 0. \quad (8)$$

Для розв'язання поставленої задачі розраховуємо передавальну функцію рекурсивного цифрового фільтра

$$K_{pцф}(z) = \frac{\hat{x}(z)}{g(z)}. \quad (9)$$

У результаті відповідних підставлень із рівнянь (4)–(6) отримаємо:

$$K_{pцф}(z) = \frac{B(z)}{B(z) + A(z)(1 - B(z))} \quad (10)$$

або

$$K_{pцф}(z) = \frac{B(z)}{A(z) + B(z)(1 - A(z))}. \quad (11)$$

Із рівняння (9) вираз для оцінки набуває такого вигляду:

$$\hat{x}(n) = \frac{B(z)}{A(z) + B(z)(1 - A(z))} g(z). \quad (12)$$

На основі рівняння (12) синтезуються рекурсивні алгоритми фільтрації, у яких відсутня математична операція розрахунку екстрапольованого значення інформаційного параметра.

Приклад 1. Припустимо, що модель вхідного сигналу описано лінійною моделлю ($m = 1$). Рівняння спостереження – вираз (1). Виконуються умови (3).

Синтез відбувається в такій послідовності. На підставі (8) визначаємо поліном $A(z)$ у такому вигляді:

$$A(z) = (1 - z^{-1})^2.$$

Із рівняння (7) знаходимо

$$B(z) = b_0.$$

Рекурсивний алгоритм фільтрації синтезуємо за таким виразом (12):

$$\hat{x}(n) = b_0 g(n) + 2(1 - b_0)\hat{x}(n - 1) - (1 - b_0)\hat{x}(n - 2). \quad (13)$$

Для синтезу нерекурсивних алгоритмів, унаслідок відсутності зворотного зв'язку, припускаємо, що у виразі (4) $[1 - A(z)] = 0$. Виходячи з припущення, маємо

$$A(z) = 1,$$

і тоді рівняння (12) набуде такого вигляду:

$$\hat{x}(n) = B(z)g(n). \quad (14)$$

У виразі (14) поліном $B(z)$ визначено за рівнянням (7), він являє собою загальновідому передавальну функцію нерекурсивного цифрового фільтра, алгоритм функціонування якого знаходимо за виразом

$$\hat{x}(n) = g(n) \sum_{j=0}^l b_j z^{-j}. \quad (15)$$

Для розрахунку коефіцієнтів b_j скористаємось твердженням, що коефіцієнти НРЦФ відповідають відлікам його імпульсної характеристики [18]. Оскільки частотна характеристика будь-якого цифрового фільтра є періодичною функцією, то його імпульсну характеристику можна обчислити за допомогою зворотного перетворення Фур'є заданої частотної характеристики:

$$W_\phi(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \omega; \\ 0, & \omega_n < |\omega| < \frac{\pi}{T}. \end{cases} \quad (16)$$

Використовуючи зворотне перетворення Фур'є дискретних сигналів, визначаємо імпульсну характеристику фільтра:

$$k(i) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T}}^{\frac{\pi}{T}} W_{\phi}(\omega) e^{j\omega iT} d\omega = \frac{T}{2\pi} \int_{-\omega_n}^{\omega_n} \cos(\omega iT) d\omega = \frac{T}{2\pi} \frac{\sin(\omega iT)}{iT} \Big|_{-\omega_n}^{\omega_n} =$$

$$= \frac{1}{2\pi i} [\sin(\omega_n iT) - \sin(-\omega_n iT)], \quad (17)$$

тут $\omega_n = 2\pi f_n$ – гранична частота сигналу.

Із рівняння (17) виводимо вираз для розрахунку коефіцієнтів НРЦФ:

$$b_i = 2f_n T \frac{\sin(2\pi f_n iT)}{2\pi f_n iT}. \quad (18)$$

Отже, вирази (15) та (18) визначають порядок синтезу нерекурсивних цифрових фільтрів, у яких для отримання оцінки використовуються лише множники з прямим зв'язком.

Приклад 2. Для умов прикладу 1 синтезуємо НРЦФ четвертого порядку.

За виразом (15) алгоритм фільтрації буде мати такий вигляд:

$$\hat{x}(n) = b_0 g(n) + b_1 g(n-1) + b_2 g(n-2) + b_3 g(n-3) + b_4 g(n-4). \quad (19)$$

Для умов $T = 0,1$ с та $f_n = 100$ Гц із рівняння (18) розраховуємо вагові коефіцієнти фільтра: $b_0 = 0,652$, $b_1 = 0,283$, $b_2 = 0,129$, $b_3 = -0,016$, $b_4 = -0,046$.

Результати моделювання. Ефективність синтезованого алгоритму оцінювали з використанням комп'ютерного моделювання. Розроблено комп'ютерну модель, яка дозволяє імітувати процес фільтрації вхідних сигналів відповідно до синтезованих рівнянь. За вхідні дані використовували реальні виміри триосьового акселерометра ADXL345, який було встановлено безпосередньо на борту БпЛА. Імітувалася зміна кута крену БпЛА (рис. 1).

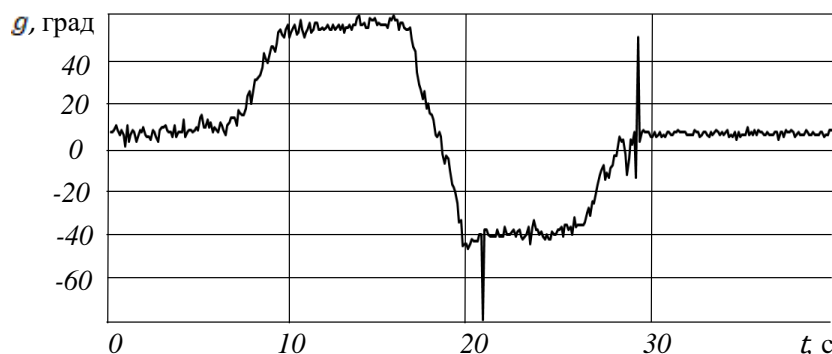


Рис. 1. Зміна кута крену БпЛА, визначеного за результатами вимірювань акселерометра

Вимірювання оброблялися з періодом $T = 0,1$ с. На рис. 2 показано результат фільтрації вимірювань із застосуванням синтезованого нерекурсивного алгоритму фільтрації (19).

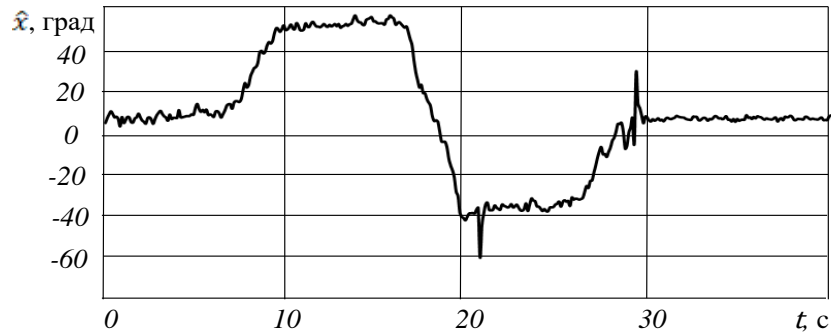


Рис. 2. Результат фільтрації кута крену БпЛА із застосуванням синтезованого НРЦФ

Отримані дані порівнювалися з результатами фільтрації із застосуванням синтезованого рекурсивного алгоритму (13) за коефіцієнта згладжування $b_0 = 0,3$ (рис. 3).

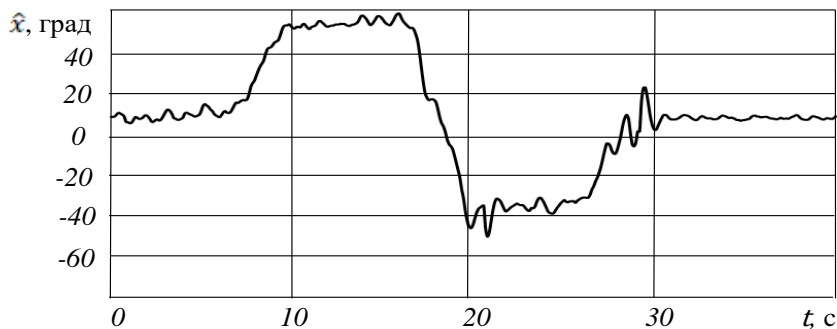


Рис. 3. Результат фільтрації кута крену БпЛА із застосуванням синтезованого РЦФ

Для кількісного оцінювання якості фільтрації розраховано дисперсію вимірювань D_g та дисперсії оцінок, отриманих із застосуванням синтезованих алгоритмів фільтрації $D_x^{нрцф}$ та $D_x^{рцф}$. Результати розрахунків надано в табл. 1.

Таблиця 1

Дисперсії оцінок

| | Часовий інтервал фільтрації, с | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0–6 | 6–10 | 10–16 | 16–20 | 20–30 | 30–40 |
| D_g , град ² | 5,72 | 22,64 | 4,61 | 93,16 | 33,78 | 0,87 |
| $D_x^{нрцф}$, град ² | 3,79 | 21,24 | 2,59 | 87,09 | 29,72 | 0,43 |
| $D_x^{рцф}$, град ² | 4,14 | 23,73 | 3,31 | 97,76 | 31,07 | 0,47 |

З отриманих результатів видно, що на інтервалах часу, де кутове положення БпЛА не змінюється, синтезований НРЦФ забезпечує високу якість фільтрації, яка проявляється в зменшенні дисперсії вхідного шуму в 1,5–2,0 рази. На інтервалах часу, де відбувається зміна кутового положення БпЛА в просторі, дисперсія вхідного шуму зменшується лише

в 1,1 раза. Синтезований РЦФ, незважаючи на закладену в нього на етапі синтезу лінійну модель руху, не забезпечив кращої якості фільтрації.

Висновки. У статті викладено методику синтезу поліноміальних НРЦФ для ІНС БпЛА на основі розвитку теоретичних положень синтезу РЦФ, які функціонують за принципом корекції передбачення. Синтезовані алгоритми, що реалізують обчислювальну процедуру фільтрації, визначено за дискретною передавальною функцією фільтра, вони є різницевиими рівняннями, коефіцієнти яких відповідають відлікам імпульсної характеристики фільтра. Завдяки нерекурсивній реалізації таких фільтрів, розв'язано проблему можливої нестійкості систем оброблення даних.

Ефективність методики показано на прикладі синтезу алгоритму фільтрації результатів навігаційних вимірювань. За результатами комп'ютерного моделювання синтезований фільтр показав досить високу якість згладжування шумів вимірювань.

Напрямом подальших досліджень стане поширення викладеного підходу для синтезу багатовимірних та комплементарних алгоритмів фільтрації для систем навігації БпЛА.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Підвищення точності автономної навігації невеликих безпілотних літальних апаратів за рахунок врахування вітру та похибок сенсорів / А. А. Шалигін, В. О. Нерубацький, А. Ф. Кудрявцев та ін. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 3 (48). С. 44–50. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.48.05>
2. Харченко В. П., Чепіженко В. І., Тунік А. А., Павлова С. В. Авіоніка безпілотних літальних апаратів. Київ : ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с.
3. Weisong Wen, Tim Pfeifer, Xiwei Bai, Li-Ta Hsu. Factor Graph Optimization for GNSS / INS Integration: A Comparison with the Extended Kalman Filter // Navigation: Journal of the Institute of Navigation. 2021. Vol. 68 (2). P. 315–331. <https://doi.org/10.1002/navi.421>
4. Захарін Ф. М., Синеглазов В. М., Філяшкін М. К. Алгоритмічне забезпечення інерціально-супутникових систем навігації : монографія. Київ : Вид-во «НАУ-друк», 2011. 320 с.
5. Рудик А. В. Акселерометричні інерціальні мікросистеми орієнтації // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XVII Міжнар. наук.-техн. конф. (8–13 червня 2017 р., м. Одеса). Одеса : Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова ; Хмельницький : ХНУ, 2017. С. 103–105.
6. Шуляк М. Л. Аналіз існуючих систем фільтрації даних при експериментальному дослідженні транспортного засобу // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2020. № 21. С. 175–184. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.175-184>
7. Розроблення та дослідження сучасних систем електроенергетики та автоматизації : Монографія / В. В. Древецький, С. В. Василець, А. В. Рудик та ін. Рівне : Овід, 2020. 380 с.
8. Новацький А. О., Коломійцев П. Є., Сапсай П. О. Комплементарний фільтр для квадрокоптера з компенсацією температурного дрейфу нуля датчика кутової швидкості // Молодий вчений. 2014. № 5 (08). С. 15–18. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2014_5%281%29_4 (дата звернення: 01.02.2026).
9. Фесенко О. Д. Вдосконалений метод орієнтації безпілотного літального апарата

в тривимірному просторі за допомогою мікроелектромеханічних систем інерціальної системи навігації на основі фільтра Маджвіка // *Авіаційна та ракетно-космічна техніка*. 2018. Т. 29 (68), Ч. 1, №3. С. 35–42. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29_3%281%29_9 (дата звернення: 02.02.2026).

10. Afshari H. H., Gadsden S. A., Habibi S. Gaussian Filters for Parameter and State Estimation: A General Review of Theory and Recent Trends // *Signal Processing*. 2017. Vol. 135. P. 218–238. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.001>

11. Guoqiang Mao, Sam Drake, Brian D. O. Anderson. Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization // *Information, Decision and Control*. IEEE. 2007. P. 224–229. <https://doi.org/10.1109/IDC.2007.374554>

12. Covariance Matching Based Adaptive Unscented Kalman Filter for Direct Filtering in INS/GNSS Integration / Yang Meng, Shesheng Gao, Yongmin Zhong et al. // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 120. P. 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.014>

13. Crassidis J. L. Sigma-Point Kalman Filtering for Integrated GPS and Inertial Navigation // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2006. Vol. 42, No. 2. P. 750–756.

14. Hoteit I., Luo Xiaodong, Pham Dinh-Tuan, Moroz I. M. Particle Kalman Filtering: A Nonlinear Framework for Ensemble Kalman Filters // *AIP Conference Proceedings*. 2010. Vol. 1281, Iss. 1. P. 1075–1079. <https://doi.org/10.1063/1.3497823>

15. Зімчук І. В., Шапар Т. М., Ковба М. В. Синтез алгоритмів фільтрації результатів вимірювань в системах навігації безпілотних літальних апаратів // *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. 2024. Вип. 96. С. 21–27. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.96.21-27>

16. Бугайов Д. В., Аврутов В. В., Нестеренко О. І. Експериментальне порівняння алгоритмів визначення орієнтації на базі компліментарного фільтра та фільтра Маджвіка // *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2020. Vol. 12, Iss. 3. P. 9–18. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i3.1855>

17. Efficiency Analysis of Polynomial Filtering Algorithms in Navigation Data Processing for a Class of Nonlinear Discrete Dynamical Systems / O. A. Stepanov, V. A. Vasiliev, M. V. Basin et al. // *IET Control Theory & Applications*. 2021. Vol. 15, № 2. P. 248–259. <https://doi.org/10.1049/cth2.12036>

18. Заболотній С. В. Цифрове оброблення сигналів : навч. посіб./ За ред. проф. Ю. Г. Леги ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 119 с. ISBN 978-966-402-093-7.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2026.

Прийнято до друку 27.03.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Shalyhin, A. A., Nerubatskyi, V. O., & Kudriavtsev, A. F. et al. (2022). Pidvyshchennia tochnosti avtonomnoi navihatsii nevelykykh bezpilotnykh litalnykh aparativ za rakhunok vrakhuvannia vitru ta pokhybok sensoriv [Improving Accuracy of Autonomous Navigation of

- Small Unmanned Aerial Vehicles by Accounting for Wind and Sensor Errors]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Force of Ukraine]*, 3 (48), 44–50. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.48.05> [in Ukrainian].
2. Kharchenko, V. P., Chepizhenko, V. I., Tunik, A. A., & Pavlova, S. V. (2012). *Avionika bezpilotnykh litalnykh aparativ [Avionics of Unmanned Aerial Vehicles]*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Weisong Wen, Tim Pfeifer, Xiwei Bai, Li-Ta Hsu. (2021). Factor Graph Optimization for GNSS / INS Integration: A Comparison with the Extended Kalman Filter. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 68 (2), 315–331. <https://doi.org/10.1002/navi.421>
4. Zakharin, F. M., Syniehlazov, V. M., & Filiashkin, M. K. (2011). *Alhorytmichne zabezpechennia inertsiialno-suputnykovykh system navihatsii: monohrafiia [Algorithmic Support of Inertial-Satellite Navigation Systems: monograph]*. Kyiv [in Ukrainian].
5. Rudyk, A. V. (2017). Akselerometrychni inertsiialni mikrosystemy orientatsii [Accelerometric Inertial Orientation Microsystems]. In *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh: materialy XVII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. [Measuring and Computing Equipment in Technological Processes: Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]*. Odesa, June 8–13, 2017. (pp. 103–105) [in Ukrainian].
6. Shuliak, M. L. (2020). Analiz isnuuychyykh system filtratsii danykh pry eksperymentalnomu doslidzhenni transportnoho zasobu [Analysis of Existing Data Filtering Systems During Experimental Research of a Vehicle]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv [Technical Service of the Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes]*, 21, 175–184. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.175-184> [in Ukrainian].
7. Drevetskyi, V. V., Vasylets, S. V., Rudyk, A. V. et al. (2020). *Rozroblennia ta doslidzhennia suchasnykh system elektroenerhetyky ta avtomatyzatsii: monohrafiia [Development and Research of Modern Power Engineering and Automation Systems: monograph]* [in Ukrainian].
8. Novatskyi, A. O., Kolomiitsev, P. Ye., & Sapsai, P. O. (2014). Komplementarnyi filtr dlia kvadrokoptera z kompensatsiieiu temperaturnoho dreifu nulia datchyka kutovoi shvydkosti [Complementary Filter for a Quadcopter with Compensation for the Temperature Drift of the Angular Velocity Sensor Zero]. *Molodyi vchenyi [Young Scientist]*, 5 (08), 15–18. Retrived from http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2014_5%281%29_4 [in Ukrainian].
9. Fesenko, O. D. (2018). Vdoskonalenyi metod orientatsii bezpilotnoho litalnoho aparata v tryvymirnomu prostori za dopomohoiu mikroelektromekhanichnykh system inertsiialnoi systemy navihatsii na osnovi filtra Madzhvika [Improved Method of Orientation of an Unmanned Aerial Vehicle in Three-Dimensional Space USING microelectromechanical Systems of an Inertial Navigation System based on the Madzhvik Filter]. *Aviatsiina ta raketno-kosmichna tekhnika [Aviation and Space Technology]*, 29 (68), 3, 35–42. Retrived from http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29_3%281%29_9 [in Ukrainian].
10. Afshari, H. H., Gadsden, S. A., & Habibi, S. (2017). Gaussian Filters for Parameter and State Estimation: A General Review of Theory and Recent Trends. *Signal Processing*, 135, 218–238. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.001>
11. Guoqiang Mao, Sam Drake, Brian D. O. Anderson. (2007). Design of an Extended Kalman Filter for UAV Localization. In *Information, Decision and Control. IEEE*. (pp. 224–229). <https://doi.org/10.1109/IDC.2007.374554>

12. Yang Meng, Shesheng Gao, Yongmin Zhong et al. (2016). Covariance Matching Based Adaptive Unscented Kalman Filter for Direct Filtering in INS/GNSS Integration. *Acta Astronautica*, 120, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.12.014>
13. Crassidis, J. L. (2006). Sigma-Point Kalman Filtering for Integrated GPS and Inertial Navigation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42, 2, 750–756. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1642588>
14. Hoteit, I., Luo, X., Pham, D.-T., & Moroz, I. M. (2010). Particle Kalman Filtering: A Nonlinear Framework for Ensemble Kalman Filters. *AIP Conference Proceedings*, 1281, 1, 1075–1079. <https://doi.org/10.1063/1.3497823>
15. Zimchuk, I. V., Shapar, T. M., & Kovba, M. V. (2024). Syntez alhorytmiv filtratsii rezultativ vymiriuvan v systemakh navihatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ [Synthesis of Measurement Filtering Algorithms in Navigation Systems of Unmanned Aircraft]. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia [Bulletin of NTUU “KPI”. Series Radio Engineering, Radio Equipment Manufacturing]*, 96, 21–27. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.96.21-27> [in Ukrainian].
16. Buhaiiov, D. V., Avrutov, V. V., & Nesterenko, O. I. (2020). Eksperymentalne porivniannia alhorytmiv vyznachennia oriientatsii na bazi komplimentarnoho filtra ta filtra Madzhvika [Experimental Comparison of Orientation Determination Algorithms Based on a Complementary Filter and a Madzhvik Filter]. *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv [Automation of Technological and Business Processes]*, 12, 3, 9–18. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i3.1855> [in Ukrainian].
17. Stepanov, O. A., Vasiliev, V. A., & Basin, M. V. et al. (2021). Efficiency Analysis of Polynomial Filtering Algorithms in Navigation Data Processing for a Class of Nonlinear Discrete Dynamical Systems. *IET Control Theory & Applications*, 15, 2, 248–259. <https://doi.org/10.1049/cth2.12036>
18. Zabolotnii, S. V. (2010). Tsyfrove obroblennia syhnaliv: navch. posib. [Digital Signal Processing: a textbook]. ISBN 978-966-402-093-7 [in Ukrainian].

I. V. Zimchuk, T. M. Shapar

SYNTHESIS OF NON-RECURSIVE DIGITAL FILTERS FOR INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS OF UNMANNED AIRCRAFT

The key requirement for navigation systems for unmanned aerial vehicles is high accuracy and reliability of navigation data determination. The basis of modern navigation systems are inertial navigation systems. They meet a whole range of important requirements, such as high information content, absolute autonomy, security and stability. In low-mass, platform-free inertial navigation systems are widely used, which are implemented on the basis of accelerometers and gyroscopes manufactured using microelectromechanical systems technology. The low accuracy of such sensors necessitates the use of additional stages of processing navigation measurements in navigation systems. As a rule, such processing is implemented using recursive digital filters that operate on the principle of predictive correction. The main problem of implementing such filters is possible instability. The article is devoted to the synthesis and study of non-recursive digital filters for platform-free inertial navigation

systems of unmanned aerial vehicles. The methodology for determining the structure and smoothing coefficients of the is presented. The methodology is presented as a development of theoretical provisions of structural synthesis of recursive digital filters, which operate on the principle of prediction correction. Smoothing filters are considered as dynamic systems described by discrete transfer functions. The non-recursive structure of digital filters is achieved by appropriate transformations of the structure of recursive filters under the condition of forced elimination of the prediction calculation operation. The algorithms that implement the computational filtering procedure are difference equations, the coefficients of which correspond to the counts of the filter impulse response. The paper provides an example of the synthesis of a non-recursive filtering algorithm, the performance and efficiency of which are investigated by computer modeling.

Keywords: *digital filter; evaluation; measurement; unmanned aerial vehicle; accelerometer; navigation system; filtering algorithm, non-recursive filter.*

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.07

УДК 621.37

М. В. Бугайов, канд. техн. наук, ст. досл.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0000-0003-0899-9843>

ВПЛИВ СПОТВОРЕНЬ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕНИ НА ПОМИЛКИ СУМАРНО-РІЗНИЦЕВОГО МЕТОДУ ПЕЛЕНГУВАННЯ

Для визначення напрямку на джерело радіовипромінювання із використанням розміщених на безпілотному літальному апараті засобів радіомоніторингу часто застосовують сумарно-різницевий метод. Проте використання амплітуд сигналів із виходів двох антен для оцінювання азимута вимагає ідентичності розрахункової та реальної діаграм спрямованості антени. Відхилення форми діаграми спрямованості реальної антени від моделі призведе до помилок в оцінюванні азимута. Метою статті є розроблення математичної моделі спотворень діаграми спрямованості антен засобу радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті та визначення впливу цих спотворень на помилки пеленгування за допомогою сумарно-різницевого методу.

Основним джерелом спотворень діаграми спрямованості антени є багатопроменеве поширення радіохвиль, що виникає під час переміщення безпілотного літального апарата. Для моделювання випадкових відхилень форми головної пелюстки діаграми спрямованості антени від розрахункової використано суму гармонічних складових із випадковими амплітудами, частотами та початковими фазами. Показано, що залежно від динаміки руху безпілотного літального апарата, частоти радіосигналу, просторового розміщення та розмірів відбивальних об'єктів, тривалості інтервалу оброблення сигналів, спотворення діаграми спрямованості можна розглядати як швидкі або повільні. Встановлено, що в разі ускладнення умов багатопроменевого поширення для швидких спотворень зміщенням оцінки азимута можна знехтувати, а її дисперсія буде зростати. У випадку ж повільних спотворень зміщення оцінки зростатиме, а її дисперсія буде такою ж, як і для неспотвореної діаграми. Наведено вирази для порівняння алгоритмів пеленгування під час роботи в умовах швидких та повільних спотворень діаграми спрямованості. Показано, що помилки пеленгування несуттєво відрізняються залежно від швидкості спотворень діаграми спрямованості антени.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; радіомоніторинг; джерело радіовипромінювання; амплітудний пеленгатор; діаграма спрямованості.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. На цей час для ведення радіомоніторингу (РМ) досить широко застосовують безпілотні літальні апарати (БпЛА) [1–3]. Для пеленгування джерел радіовипромінювання (ДРВ) за допомогою розміщених на БпЛА засобів РМ часто використовують сумарно-різницевий метод, який є стійким до впливу багатопроменевого поширення, простим у реалізації та має високу швидкодію.

© М. В. Бугайов, 2026

Проте застосування амплітуд сигналів із виходів двох антен для оцінювання азимуту вимагає ідентичності розрахункової та реальної діаграм спрямованості (ДС) антени. Відхилення форми ДС реальної антени від прийнятої для розрахунків моделі призведе до помилок, пов'язаних із неправильністю виразу для оцінювання азимута. Тому дослідження впливу спотворень ДС антен на помилки сумарно-різницевого методу пеленгування з метою прогнозування потенційних можливостей засобів РМ для БПЛА є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі питання впливу спотворень ДС на роботу радіотехнічних систем розглянуто в [4–6]. У [7–9] проаналізовано вплив спотворень ДС антени на радіолокаційні вимірювання, включаючи системи із синтезованою апертурою. У [10] досліджено адитивні та мультиплікативні спотворення апертури антени радіометра, запропоновано підходи до їх корегування. Метод компенсації помилок у формуванні ДС антени МІМО радара із синтезованою апертурою наведено в [11]. У [12] розглянуто питання оцінювання помилок визначення напрямку на радіолокаційну ціль у разі відхиленні форми ДС від моделі. Для зменшення помилок запропоновано здійснювати калібрування шляхом часового усереднення вимірювань. Недослідженим залишається питання впливу відхилень форми ДС антени від розрахункової на помилки оцінювання напрямку на ДРВ амплітудним методом під час ведення РМ за допомогою БПЛА.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення математичної моделі спотворень ДС антен засобу РМ на БПЛА та визначення впливу таких спотворень на помилки сумарно-різницевого методу пеленгування ДРВ.

Виклад основного матеріалу

1. Модель спотворень головної пелюстки ДС

Для апроксимації головної пелюстки ДС антени будемо використовувати криву Гаусса, яку найчастіше застосовують із цією метою [13], відповідно до такого виразу:

$$G(\theta) = G_0 e^{-\frac{k\theta^2}{\Delta\theta^2}}, \quad (1)$$

де G_0 – коефіцієнт підсилення антени в напрямку максимуму ДС;

θ – поточне значення азимута;

$\Delta\theta$ – ширина ДС антени на рівні 0,707;

$k = 2\ln 2$ – коефіцієнт, для якого ширина ДС на рівні $A = 0,707$ від максимуму становить $\Delta\theta$.

Форма ДС антени є неприциповою в межах цього дослідження й обрана в конкретному вигляді лише для проведення числових розрахунків і кількісного порівняння результатів.

Оцінку напрямку на ДРВ для сумарно-різницевого алгоритму пеленгування розраховують за таким виразом:

$$\hat{\theta} = \frac{\Delta\theta^2}{2k\delta} \ln \frac{A_1}{A_2} + \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

де δ – рознесення між максимумами ДС сусідніх антен;

A_1, A_2 – амплітуди сигналів із першої та другої антен відповідно.

Для безповоротної антенної системи з компенсацією дисперсії шуму оцінку напрямку на ДРВ розраховують за таким виразом:

$$\hat{\theta} = \frac{\Delta\theta^2}{2k\delta} \ln \sqrt{\frac{P_2(\theta) - \hat{\sigma}_{\xi_2}^2}{P_1(\theta) - \hat{\sigma}_{\xi_1}^2}} + \frac{\delta}{2}, \quad (3)$$

де $P_1(\theta), P_2(\theta)$ – виміряні значення потужностей сигнальної суміші в каналах;

$\hat{\sigma}_{\xi_1}^2, \hat{\sigma}_{\xi_2}^2$ – оцінки дисперсії шуму в каналах.

Похибки у вирази (2)–(3) вносяться як через відхилення ширини ДС $\Delta\theta$ від розрахункової, так і відхилення форми самої ДС у точках оцінювання азимута.

Основними причинами спотворення ДС антен у разі їх розміщення на БПЛА є: вплив монтажних конструкцій поблизу антени, зокрема елементів самого апарата, та багатопроневе поширення, що змінює форму ДС дальнього поля. Перший вид спотворень можна компенсувати шляхом калібрування ДС антенної системи під час її встановлення на БПЛА. Тому основним джерелом спотворень ДС у межах цього дослідження, яке неможливо заздалегідь передбачити і врахувати, будемо вважати багатопроневе поширення радіохвиль, що виникає під час переміщення БПЛА. Це явище створює інтерференційні мінімуми та максимуми електромагнітного поля в просторі, спотворюючи реальну ДС та амплітудний розподіл, що призводить до значних похибок пеленгування. Тоді для моделювання випадкових відхилень форми головної пелюстки ДС антени від розрахункової будемо використовувати суму гармонічних складових із випадковими амплітудами, частотами та початковими фазами. Вираз для опису ДС зі спотвореннями запишемо в такому вигляді:

$$G_h(\theta) = G(\theta) + \sum_{i=1}^{N_h} A_{hi} \sin(2\pi F_{hi}\theta + \phi_{hi}), \quad (4)$$

де $G(\theta)$ – нормована крива, що описує головну пелюстку ДС антени без спотворень;

N_h – кількість гармонік (шляхів поширення радіосигналу);

A_{hi} – амплітуда i -ї гармоніки, що є випадковою, рівномірно розподіленою величиною в діапазоні $[0, A_m]$, де A_m – деяке додатне число, менше 1. Значення A_{hi} відображають здатність предметів біля БПЛА відбивати радіохвилі;

F_{hi} – частота i -ї гармоніки, що є випадковою, рівномірно розподіленою величиною в діапазоні $[0, a(\Delta\theta)^{-1}]$, де $\Delta\theta$ – ширина ДС антени; a – параметр, що відповідає за порізаність ДС (у разі збільшення a порізаність зростає) і визначається несучою частотою радіосигналу;

ϕ_{hi} – фаза i -ї гармоніки, що є випадковою, рівномірно розподіленою величиною в діапазоні $[0, 2\pi]$.

На рис. 1 наведено кілька реалізацій пари ДС антен з різними параметрами моделі (4), де $G_1(\theta), G_2(\theta)$ – ДС антен, що використовуються для реалізації сумарно-різницевого методу пеленгування, без спотворень, а $G_{h1}(\theta), G_{h2}(\theta)$ – відповідні ДС зі спотвореннями.

Визначальну роль у спотворенні ДС відіграє значення параметра A_m , що відповідає за амплітуди складових багатопроменевого поширення. Чим далі антена БПЛА буде переміщуватися від відбивачів радіохвиль, тим меншими будуть спотворення ДС. Також за решти незмінних параметрів у разі збільшення кількості шляхів поширення сигналу N_h рівень спотворень зростатиме. Параметр a визначає порізаність ДС і зростає в ході збільшення швидкості переміщення БПЛА відносно ДРВ та відбивальних предметів.

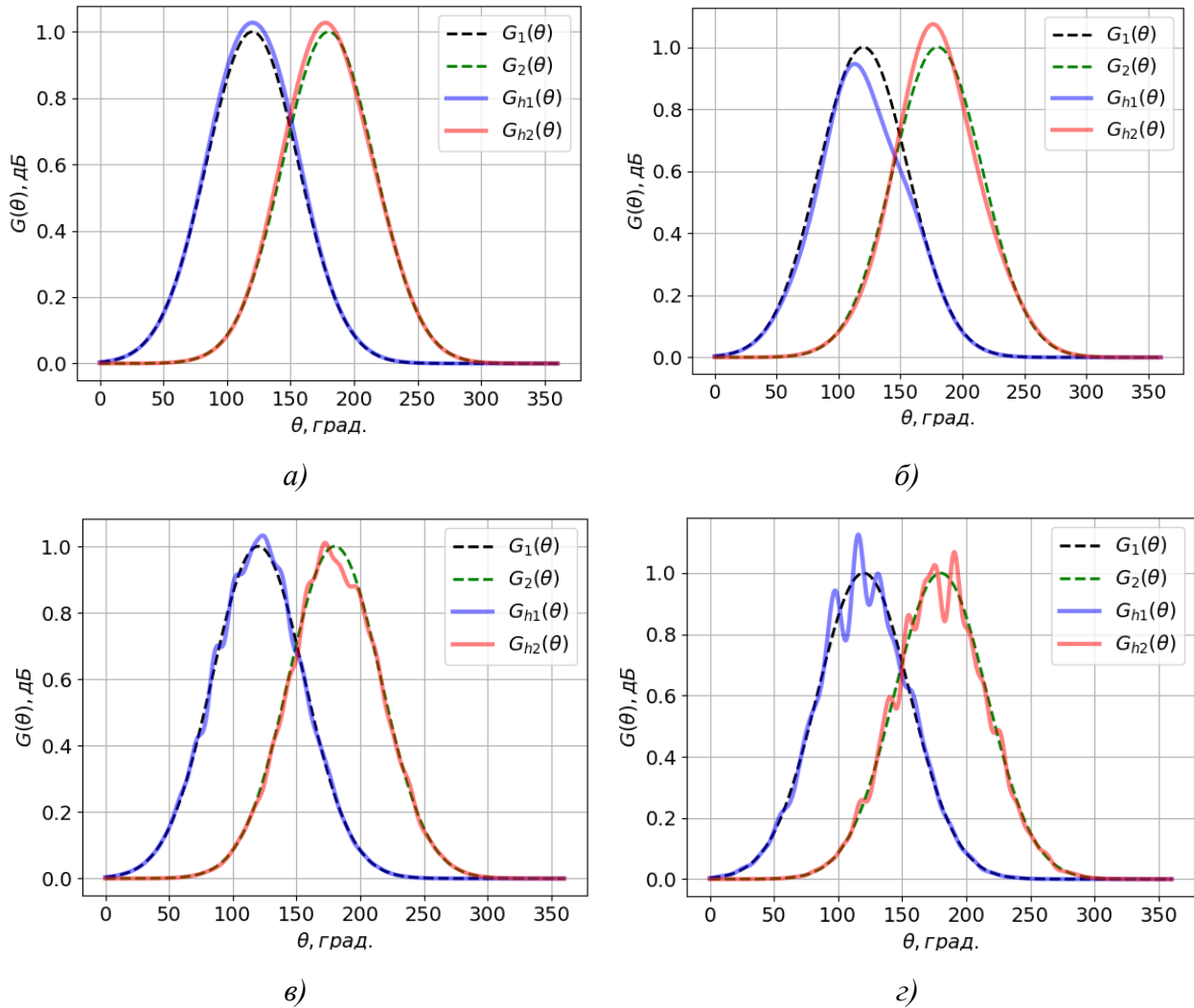


Рис. 1. Спотворення ДС пари антен для $N_h = 10$, $\Delta\theta = 60^\circ$: якщо $a = 1$, за $A_m = 0,01$ (а) та $A_m = 0,05$ (б); якщо $a = 5$, за $A_m = 0,01$ (в) та $A_m = 0,05$ (з)

Як міру спотворень ДС антени доцільно використовувати максимальне абсолютне значення її відхилення ΔG_{max} від моделі. На рис. 2 наведено залежність ΔG_{max} від A_m для деяких значень N_h . Ці залежності отримані шляхом статистичного моделювання, вони демонструють практично лінійне зростання ΔG_{max} як від параметра A_m , так і від N_h . Проте для амплітудного методу пеленгування суттєву роль відіграє не лише абсолютне максимальне значення відхилення, а й місце розташування спотворень – у максимумі головної пелюстки ДС чи на її схилі, оскільки крутизна ДС і, відповідно, точність пеленгування залежать від напрямку надходження радіосигналу θ .

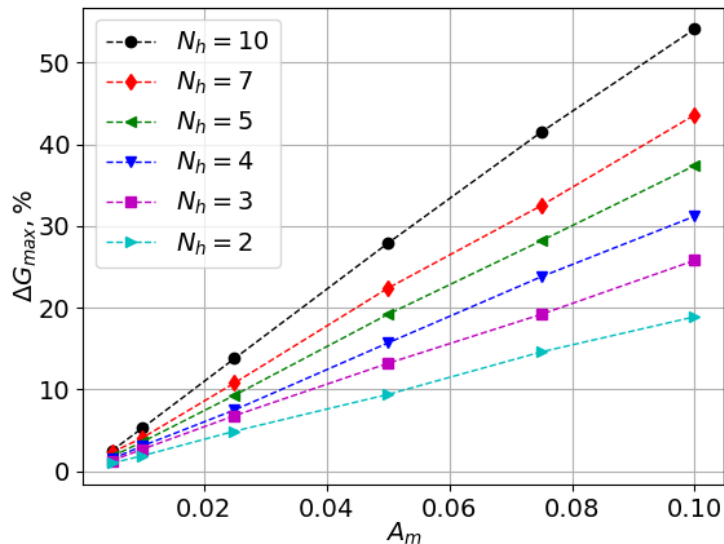


Рис. 2. Залежність ΔG_{max} від A_m для деяких значень N_h

Припускаємо, що під час ведення РМ БпЛА постійно переміщується відносно ДРВ та об'єктів, від яких відбиваються радіосигнали. Через це постійно будуть змінюватися умови багатопробного поширення радіохвиль. У такому разі, залежно від динаміки руху БпЛА, частоти радіосигналу, просторового розміщення та розмірів відбивальних об'єктів, тривалості інтервалу оброблення сигналів ДРВ, спотворення ДС можна розглядати як швидкі або повільні.

2. Швидкі спотворення ДС

Якщо за час оцінювання напрямку на ДРВ T_A форма ДС багаторазово змінюється, то спотворення вважаємо швидкими. Такий випадок характерний для високих частот радіосигналів та швидкостей польоту БпЛА. За час аналізу сигналу азимут оцінюють декілька разів, а результати усереднюють. Проте для коректного пеленгування за час аналізу T_A напрямки на ДРВ повинні залишатися практично незмінними. В умовах багатопробного замирання відстань, у разі переміщення БпЛА, на яку ДС суттєво зміниться, становитиме величину порядку половини довжини радіохвилі [14]. Тому за відстані до ДРВ більше 1 км і переміщення БпЛА на відстань до 10 довжин хвиль для частоти 300 МГц за час T_A кутове зміщення БпЛА відносно ДРВ не перевищуватиме 1° , відповідно, його можна вважати несуттєвим порівняно з помилками пеленгування.

Для дослідження впливу помилок апроксимації головної пелюстки ДС антени на помилки пеленгування будемо розраховувати середньоквадратичне відхилення (СКВ) оцінки напрямку на ДРВ σ_θ та її зміщення Δ_θ . У ході розрахунків вважатимемо, що спотворення ДС кожної з антен є незалежними та випадковими. Як сигнал будемо використовувати гармонічне коливання, що приймається на фоні білого гаусівського шуму. Довжина реалізації прийнятої сигнальної суміші становить $N = 10^3$ відліків. Моделювання проводитимемо для 10^4 реалізацій сигнальної суміші. Ширину ДС для розрахунків візьмемо рівною $\Delta\theta = 60^\circ$, а рознесення між максимумами ДС – $\delta = \Delta\theta$. Такі значення є типовими для більшості широкосмугових спрямованих антен, що використовуються для розроблення радіопеленгаторів для БпЛА.

На рис. 3 наведено залежності СКВ σ_θ та зміщення Δ_θ оцінок напрямку на ДРВ, розраховані із використанням алгоритмів без компенсації дисперсії шуму (2) та з компенсацією (3) від відношення сигнал-шум (ВСШ) q для $N_h = 5$ та $A_m = 0,01$.

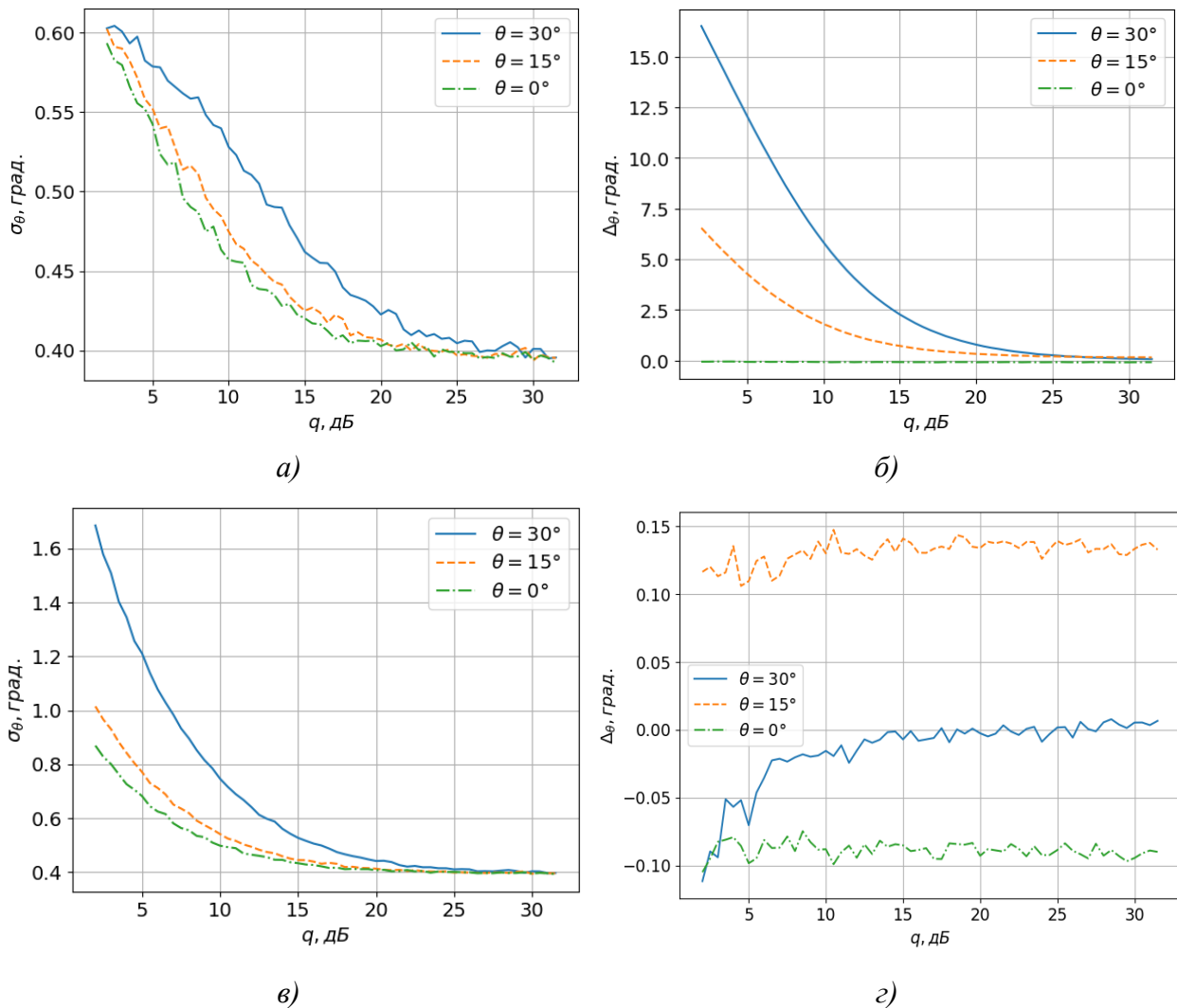


Рис. 3. СКВ (без компенсації дисперсії шуму (а) і з компенсацією (в)) та зміщення оцінок напрямку на ДРВ (без компенсації дисперсії шуму (б) і з компенсацією (г)) для $N_h = 5$, $A_m = 0,01$

На рис. 4 наведено аналогічні залежності для $N_h = 5$ та $A_m = 0,075$. У ході досліджень встановлено, що значення помилок пеленгування не залежать від параметра a у виразі (4).

Для $A_m > 0,02$ і алгоритму без компенсації дисперсії шуму значення σ_θ зростає у разі збільшення ВСШ, а за $q > 25$ дБ залишається практично незмінним. Для алгоритму з компенсацією дисперсії шуму в разі збільшення ВСШ σ_θ зменшується, а за $q > 15$ дБ залишається практично незмінним. Для $A_m < 0,02$ у разі збільшення ВСШ значення σ_θ зменшується для обох алгоритмів.

Для алгоритму без компенсації дисперсії шуму зміщення Δ_θ зменшується за умови зростання ВСШ. Для алгоритму з компенсацією рівня шуму зміщення практично відсутнє незалежно від ВСШ, причому значення зміщення практично не залежить від A_m .

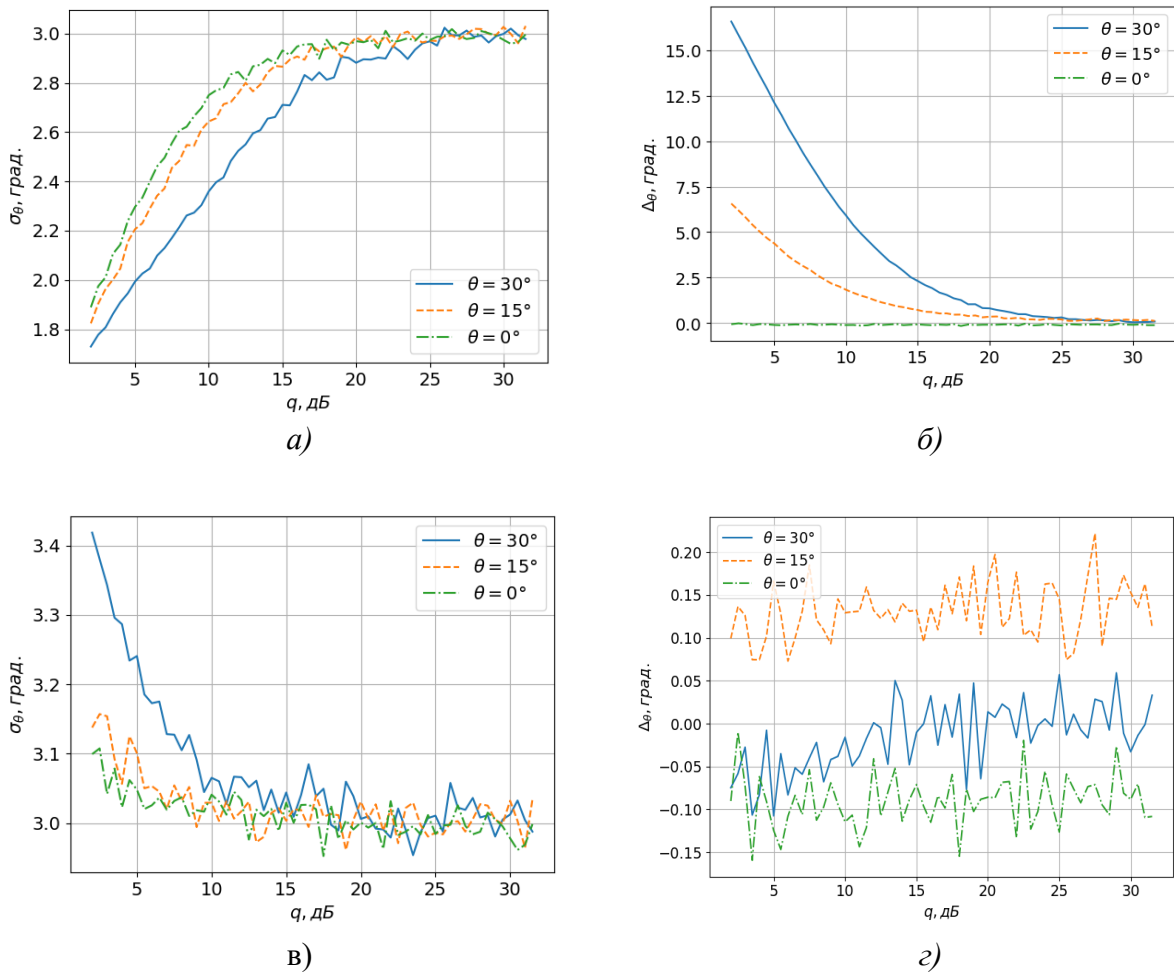


Рис. 4. СКВ (без компенсації дисперсії шуму (а) та з компенсацією (в)) і зміщення оцінок напрямку на ДРВ (без компенсації дисперсії шуму (б) та з компенсацією (г)) для $N_h = 5$, $A_m = 0,075$

Для випадку швидких спотворень ДС, коли значення азимута оцінюється шляхом усереднення кількох оцінок, значення СКВ для обох алгоритмів у разі збільшення ВСШ наближається до значень, наведених у табл. 1. За зростання A_m значення σ_θ зростає лінійно.

Таблиця 1

Залежність σ_θ від A_m

| A_m | 0,005 | 0,01 | 0,025 | 0,05 | 0,075 | 0,1 |
|------------------------|-------|------|-------|------|-------|-----|
| σ_θ , град | 0,2 | 0,4 | 1 | 2 | 3 | 4 |

3. Повільні спотворення ДС

Спотворення вважатимемо повільними, коли за час оцінювання напрямку на ДРВ T_A форма ДС залишається практично незмінною. Для такого виду спотворень зміщення оцінки напрямку на ДРВ Δ_θ не буде нульовим навіть для рівносигнального напрямку і завжди перевищуватиме зміщення для розрахункової ДС. Дисперсія оцінки буде такою ж, як і для неспотвореної ДС для заданого ВСШ.

У разі зростання A_m зміщення зростає незалежно від a , оскільки принциповим є лише зростання рівня спотворень форми ДС, а не частоти їх появи. Зміщення спостерігається як для алгоритму без компенсації дисперсії шуму, так і з її компенсацією (рис. 5). Проте для алгоритму із компенсацією (рис. 5б) воно не залежить від ВСШ. Зміщення є різним для різних θ і визначається величиною спотворення обох ДС для конкретного напрямку на ДРВ. Причому в разі зростання ВСШ значення зміщення для конкретного азимута для обох алгоритмів збігаються. За збільшення N_h значення як зміщення, так і дисперсії оцінки напрямку на ДРВ зростають, оскільки зростають спотворення ДС антени.

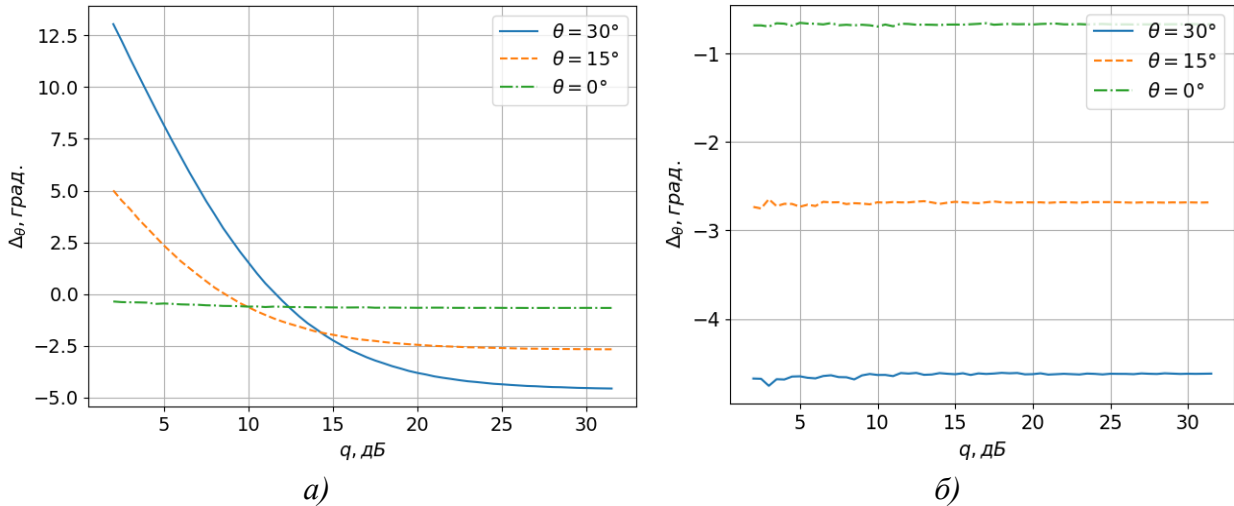


Рис. 5. Зміщення оцінок напрямку на ДРВ без компенсації дисперсії шуму (а) та з компенсацією (б) для $N_h = 10, A_m = 0,1$

Порівнюючи наведені на рис. 3–4 та рис. 5 залежності, можна зробити висновок, що для швидких спотворень ДС зміщення оцінки буде меншим, ніж для повільних, за рахунок усереднення як додатних, так і від’ємних зміщень оцінки азимута. СКВ оцінки для швидких спотворень, навпаки, буде зростати через додавання дисперсій окремих оцінок азимута. Отже, у разі ускладнення умов багатопроменевого поширення (зростання кількості та інтенсивності багатопроменевих складових радіосигналу) для швидких спотворень ДС, зміщенням оцінки азимута можна знехтувати, а її СКВ буде зростати. У разі ж повільних спотворень ДС зміщення оцінки напрямку на ДРВ зростатиме, а її СКВ буде таким самим, як і для неспотвореної ДС.

4. Порівняння алгоритмів пеленгування для швидких та повільних спотворень ДС

Для чисельного порівняння сумарно-різницевого алгоритму з компенсацією дисперсії шуму (3) будемо використовувати інтегральну середню сумарну помилку RB ($RMSE + bias$), що враховує СКВ та зміщення оцінки азимута для усіх ВСШ й азимутів для деякого значення A_m . Цю помилку для випадку швидких спотворень ДС будемо розраховувати за таким виразом:

$$RB_{fast} = \frac{2}{\Delta q \Delta \theta} \int_0^{\Delta \theta / 2} \int_{q_{min}}^{q_{max}} \sigma_\theta(\theta, q) d\theta dq + \frac{2}{\Delta q \Delta \theta} \int_0^{\Delta \theta / 2} \int_{q_{min}}^{q_{max}} |\Delta_\theta(\theta, q)| d\theta dq, \quad (5)$$

де q_{min}, q_{max} – робочі мінімальне та максимальне значення ВСШ, $\Delta q = q_{max} - q_{min}$;

$\sigma_\theta(\theta, q)$, $\Delta_\theta(\theta, q)$ – залежності СКВ та зміщення оцінки азимута, наведені на рис. 3–4.

Для випадку повільних спотворень ДС антени усереднення оцінок напрямку на ДРВ не забезпечує компенсації зміщення азимута, оскільки форма ДС за час T_A практично не змінюється. Тому значення помилки пеленгування буде залежати виключно від рівня спотворень ДС у конкретній точці простору. Помилку RB у такому разі оцінюватимемо як усереднене інтегральне СКВ оцінки азимута та усереднене за ансамблем інтегральне зміщення оцінки азимута відповідно до такого виразу:

$$RB_{slow} = \frac{2}{\Delta q \Delta \theta} \int_0^{\Delta \theta / 2} \int_{q_{min}}^{q_{max}} \sigma_\theta(\theta, q) d\theta dq + \frac{2}{\Delta \theta} \langle \int_0^{\Delta \theta / 2} |\Delta_\theta(\theta)| d\theta \rangle, \quad (6)$$

де $\langle \rangle$ – знак усереднення за ансамблем можливих ДС.

На рис. 6 показано залежність помилки RB від A_m для $N_h = 5$, $\Delta \theta = 60^\circ$, $q_{min} = 2$ дБ, $q_{max} = 32$ дБ для алгоритму з компенсацією рівня шуму (3) і випадків швидких та повільних спотворень ДС. Як бачимо, для незначних відхилень ДС від моделі (малих значень A_m) помилки пеленгування є однаковими як для швидких RB_{fast} , так і для повільних RB_{slow} спотворень ДС. Зі зростанням відхилень ДС від моделі у разі повільних спотворень ДС можна досягти менших помилок пеленгування.

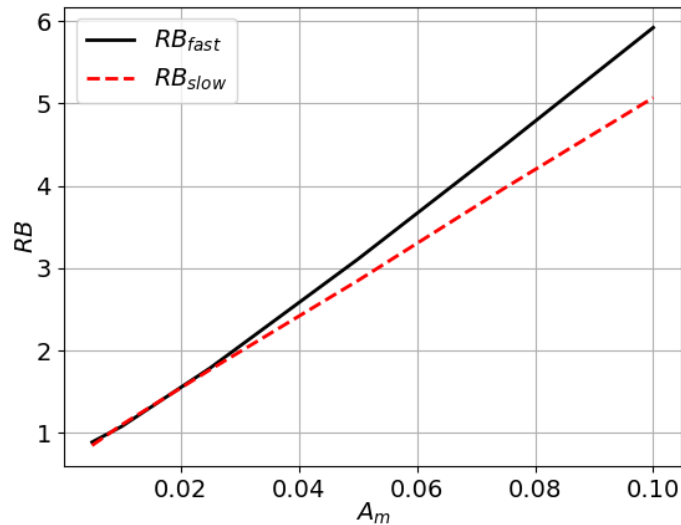


Рис. 6. Залежність значення RB від A_m

Як підходи до боротьби з помилками пеленгування, що виникають за рахунок спотворень головної пелюстки ДС антен, можна визначити такі:

звужувати ДС, що забезпечить потрапляння меншої кількості багатопроменевих складових у її головну пелюстку та її менших спотворень;

унікати прольоту БпЛА біля великих відбивальних об'єктів під час планування маршруту.

Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробленні математичної моделі швидких та повільних спотворень ДС антен засобу РМ на БпЛА й оцінюванні впливу цих спотворень на помилки пеленгування ДРВ за допомогою сумарно-різницевого методу. Показано, що помилки пеленгування несуттєво

відрізняються залежно від швидкості спотворень ДС антени, а визначаються виключно глибиною її спотворень. Отримані результати можуть бути впроваджені в наявні та перспективні комплекси й системи РМ на базі БПЛА, оскільки дозволять підвищити ефективність пошуку ДРВ в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у дослідженні можливостей визначення місцеположення ДРВ за допомогою розміщеного на БПЛА засобу РМ в умовах багатопромених завмирань.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Papoci P., Radisic T., Mustra M. Integration of Software Defined Radio on an Unmanned Aerial Vehicle // *Transportation Research Procedia*. 2022. № 64. P. 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.035>
2. Gul N., Kim S. M., Ali J., Kim J. UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *PLoS One*. 2023. Vol. 5. 36 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
3. Shen F., Ding G., Wang Z., Wu Q. UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, № 6. P. 5711–5722. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909167>
4. Rodriguez I., Nguyen H. C., Sorensen T. B., Franek O. Base Station Antenna Pattern Distortion in Practical Urban Deployment Scenarios // *IEEE 80th Vehicular Technology Conference*. Vancouver, BC, Canada, 2014. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6965887>
5. Schippers H., Spalluto G., Vos G. Radiation Analysis of Conformal Phased Array Antennas on Distorted Structures // *12th International Conference on Antennas and Propagation*. Exeter, UK, 2003. Vol. 1. P. 160–163. <https://doi.org/10.1049/cp:20030040>
6. A Cross-Correlation-Based Approach to Pattern Distortion and Mutual Coupling for Shared-Aperture Antennas / Heo J. M. et al. // *Appl. Sci*. 2021, № 11, 9652. <https://doi.org/10.3390/app11209652>
7. Laws K., Paduan J. D., Vesecky J. Estimation and Assessment of Errors Related to Antenna Pattern Distortion in CODAR SeaSonde High-Frequency Radar Ocean Current Measurements // *J. Atmos. Oceanic Technol*. 2010. № 27. P. 1029–1043. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO658.1>
8. Ye H., Kuang Y., Shen Y., Qin G. The Influence Analysis of Antenna Radiation Pattern Aberration of Airborne Radar on Clutter Feature // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2022. P. 933–949. <https://doi.org/10.1049/mia2.12314>
9. Calibrating the Amplitude and Phase Imbalances in AgileDARN HF Radar / Deng X. et al. // *Radio Science*. 2021. № 56, e2020RS007138. <https://doi.org/10.1029/2020RS007138>
10. Analysis and Correction of Antenna Pattern Errors for In-Orbit Fully Polarimetric Aperture Synthesis Radiometer / Wu Y. et al. // *Remote Sensing*. 2025. № 17 (8), 1414. <https://doi.org/10.3390/rs17081414>
11. Geiss J., Sippel E., Braunwarth M., Vossiek M. The Impact of Antenna Array Calibration Errors on MIMO and Multi-Channel Synthetic Aperture Radar Imaging // *IEEE Journal of Microwaves*. 2023. Vol. 3, № 2. P. 635–654. <https://doi.org/10.1109/JMW.2023.3254135>

12. Lai Y., Zhou H., Zeng Y., Wen B. Quantifying and Reducing the DOA Estimation Error Resulting from Antenna Pattern Deviation for Direction-Finding HF Radar // *Remote Sens.* 2017. № 9, 1285. <https://doi.org/10.3390/rs9121285>
13. Improving Accuracy of an Amplitude Comparison-Based Direction-Finding System by Neural Network Optimization / Yan E. et al. // *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 169688–169700. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024031>
14. Бугайов М. В. Оптимізація швидкості польоту безпілотної літальної апаратури під час ведення радіомоніторингу // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 28 (I). С. 4–15.* <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.01>

Стаття надійшла до редакції 16.03.2026.

Прийнято до друку 06.04.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Papoci, P., Radisic, T., & Mustra, M. (2022). Integration of Software Defined Radio on an Unmanned Aerial Vehicle. *Transportation Research Procedia*, 64, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.035>
2. Gul, N., Kim, S. M., Ali, J., & Kim, J. (2023). UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *PLoS One*, 5, 36. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
3. Shen, F., Ding, G., Wang, Z., & Wu, Q. (2019). UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68, 6, 5711–5722. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909167>
4. Rodriguez, I., Nguyen, H. C., Sorensen, T. B., & Franek, O. (2014). Base Station Antenna Pattern Distortion in Practical Urban Deployment Scenarios. In *IEEE 80th Vehicular Technology Conference*. Vancouver, BC, Canada. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2014.6965887>
5. Schippers, H., Spalluto, G., & Vos, G. (2003). Radiation Analysis of Conformal Phased Array Antennas on Distorted Structures. In *12th International Conference on Antennas and Propagation*. Exeter, UK. (pp. 160–163). <https://doi.org/10.1049/cp:20030040>
6. Heo J. M. et al. (2021). A Cross-Correlation-Based Approach to Pattern Distortion and Mutual Coupling for Shared-Aperture Antennas. *Appl. Sci.*, 11, 9652. <https://doi.org/10.3390/app11209652>
7. Laws, K., Paduan, J. D., & Vesecky, J. (2010). Estimation and Assessment of Errors Related to Antenna Pattern Distortion in CODAR SeaSonde High-Frequency Radar Ocean Current Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 1029–1043. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO658.1>
8. Ye, H., Kuang, Y., Shen, Y., & Qin, G. (2022). The Influence Analysis of Antenna Radiation Pattern Aberration of Airborne Radar on Clutter Feature. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 933–949. <https://doi.org/10.1049/mia2.12314>
9. Deng, X. et al. (2021). Calibrating the Amplitude and Phase Imbalances in AgileDARN HF Radar. *Radio Science*, 56, e2020RS007138. <https://doi.org/10.1029/2020RS007138>
10. Wu, Y. et al. (2025). Analysis and Correction of Antenna Pattern Errors for In-Orbit Fully Polarimetric Aperture Synthesis Radiometer. *Remote Sensing*, 17 (8), 1414. <https://doi.org/10.3390/rs17081414>

11. Geiss, J., Sippel, E., Braunwarth, M., & Vossiek, M. (2023). The Impact of Antenna Array Calibration Errors on MIMO and Multi-Channel Synthetic Aperture Radar Imaging. *IEEE Journal of Microwaves*, 3, 2, 635–654. <https://doi.org/10.1109/JMW.2023.3254135>
12. Lai, Y., Zhou, H., Zeng, Y., & Wen, B. (2017). Quantifying and Reducing the DOA Estimation Error Resulting from Antenna Pattern Deviation for Direction-Finding HF Radar. *Remote Sens*, 9, 1285. <https://doi.org/10.3390/rs9121285>
13. Yan, E. et al. (2020). Improving Accuracy of an Amplitude Comparison-Based Direction-Finding System by Neural Network Optimization. *IEEE Access*, 8, 169688–169700. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024031>
14. Buhaiov, M. V. (2025). Optymizatsiia shvydkosti polotu bezpilotnoho litalnoho aparatf pid chas vedennia radiomonitorynhu [Unmanned Aerial Vehicle Flight Speed Optimization for Spectrum Sensing]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 28 (I), 4–15. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.01> [in Ukrainian].

M. V. Buhaiov

ANTENNA DIRECTIONAL PATTERN DISTORTIONS INFLUENCE ON ERRORS OF SUM-DIFFERENCE DIRECTION FINDER

To determine the direction on radio frequency emitter with unmanned aerial vehicle based radio monitoring devices, the sum-difference method is often used. However, using the amplitudes of signals from the outputs of two antennas to estimate the azimuth requires calculated and actual antenna directional patterns to be identical. Deviations in shape of actual antenna's directional pattern from the model will lead to errors in azimuth estimation. The purpose of this article is to develop a mathematical model of antenna directional pattern distortions in unmanned aerial vehicle based radio frequency sensor and to determine the impact of these distortions on bearing errors using the sum-difference method. The main source of antenna pattern distortion is multipath propagation of radio waves that occurs during the movement of an unmanned aerial vehicle. To model random deviations of the main lobe shape of the antenna directional pattern from the calculated one, the sum of harmonic components with random amplitudes, frequencies, and initial phases was used. It has been shown that, depending on the dynamics of the unmanned aerial vehicle's movement, signal frequency, spatial arrangement and dimensions of the reflecting objects, and the signal processing interval duration, the directional pattern distortion can be considered fast or slow. It has been shown that when multipath propagation conditions become more complex, for fast distortions, bias of the azimuth estimate can be neglected, and its variance will increase. In the case of slow distortions, the bias estimate will increase, and its variance will be the same as for an undistorted antenna directional pattern. Expressions are given for comparing bearing algorithms when operating under conditions of fast and slow directional pattern distortions. It is shown that bearing errors do not differ significantly depending on the speed of the antenna directional pattern distortions.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; spectrum sensing; radio frequency emitter; amplitude direction finder; directional pattern.*

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.08

УДК 355.41:378.147:519.8

С. І. Поплавець, Ph. D., доц.

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

<https://orcid.org/0009-0003-7538-0941>

О. Ю. Чернявський, канд. техн. наук

Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-9388-4604>

І. А. Сампір

Командно-штабний інститут застосування військ (сил) Національного університету

оборони України

<https://orcid.org/0000-0003-3194-893X>

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ З ВІЙСЬКОВОЇ ТОПОГРАФІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ МЕРЕЖЕВОГО ПЛАНУВАННЯ

У статті розроблено та обґрунтовано науково-методичний підхід до організації та проведення практичних занять з військової топографії із застосуванням методів мережевого планування. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання навчального часу, раціонального розподілу ресурсів і вдосконалення практичної підготовки курсантів у вищих військових навчальних закладах. Встановлено, що традиційні підходи до планування занять недостатньо враховують взаємозв'язки між етапами виконання навчальних робіт, можливість їх паралельного виконання та наявність часових резервів, що призводить до нераціонального використання часу й навчально-матеріальної бази.

Практичне заняття розглянуто як сукупність взаємопов'язаних робіт, обмежених у часі та ресурсах. Для формалізації його структури застосовано методи мережевого планування та критичного шляху. У межах дослідження розроблено дерево проблем і дерево цілей, побудовано мережевий графік проведення заняття, визначено критичний шлях, розраховано часові параметри та резерви часу робіт. Для наочного відображення послідовності й паралельності виконання навчальних завдань побудовано діаграму Ганта.

Запропонований підхід передбачає поділ курсантів на підгрупи з паралельним виконанням окремих топографічних завдань, що забезпечує скорочення непродуктивних витрат часу, підвищення ефективності використання навчально-матеріальної бази та покращення керованості навчального процесу. Встановлено, що застосування методів мережевого планування дозволяє оптимізувати структуру практичного заняття, завчасно оцінити тривалість виконання робіт і підвищити ефективність організації практичної підготовки курсантів.

© С. І. Поплавець, О. Ю. Чернявський, І. А. Сампір, 2026

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні науково-методичного підходу до організації практичних занять з військової топографії на основі мережевого планування з визначенням критичного шляху та часових параметрів виконання робіт, а практична значущість результатів – у можливості використання запропонованого підходу під час планування й проведення практичних занять у вищих військових навчальних закладах для підвищення ефективності організації навчального процесу та раціонального використання навчального часу і ресурсів.

Ключові слова: *військова топографія; діаграма Ганта; мережеве планування; мережевий графік; метод критичного шляху; організація навчального процесу; практичні заняття.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Практичні заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” є важливою складовою підготовки майбутніх офіцерів, оскільки саме під час їх проведення формуються стійкі практичні навички орієнтування на місцевості, роботи з топографічними картами, визначення координат об’єктів, побудови маршрутів руху, виконання топографічних нормативів тощо. Ефективність таких занять значною мірою залежить від рівня організації навчального процесу, раціонального використання навчального часу, особового складу та навчальних засобів.

Водночас аналіз практики планування і проведення занять з військової топографії свідчить, що переважно застосовуються традиційні підходи до організації занять, за яких тривалість виконання окремих практичних заходів визначається орієнтовно, без формалізованого урахування взаємозв’язків між ними, можливості їх паралельного виконання та наявності часових резервів. Це призводить до нераціонального використання навчального часу, перевантаження окремих етапів заняття, зниження керованості освітнього процесу та, як наслідок, недостатнього рівня сформованості практичних і управлінських компетентностей курсантів.

Одним із перспективних напрямів розв’язання зазначеної проблеми є застосування методів мережевого планування, що дозволяють розглядати практичне заняття як керований процес, обмежений у часі та ресурсах.

Для систематизації причинно-наслідкових зв’язків досліджуваної проблеми використано інструмент системного аналізу – дерево проблем. Воно дозволяє структуровано відобразити основну проблему організації практичних занять, її причини та наслідки. Дерево проблем організації практичних занять з військової топографії наведено на рис. 1. Результати його аналізу свідчать про необхідність розроблення науково обґрунтованого підходу до організації та планування проведення занять, який дозволив би забезпечити раціональну послідовність виконання навчальних робіт, оптимізувати використання навчального часу та підвищити ефективність підготовки курсантів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У навчально-методичних працях із військової топографії [1–5] детально розглянуто питання орієнтування на місцевості, роботи з топографічними картами, визначення координат об’єктів, побудови маршрутів руху, а також топогеодезичного забезпечення дій підрозділів у різних умовах обстановки.

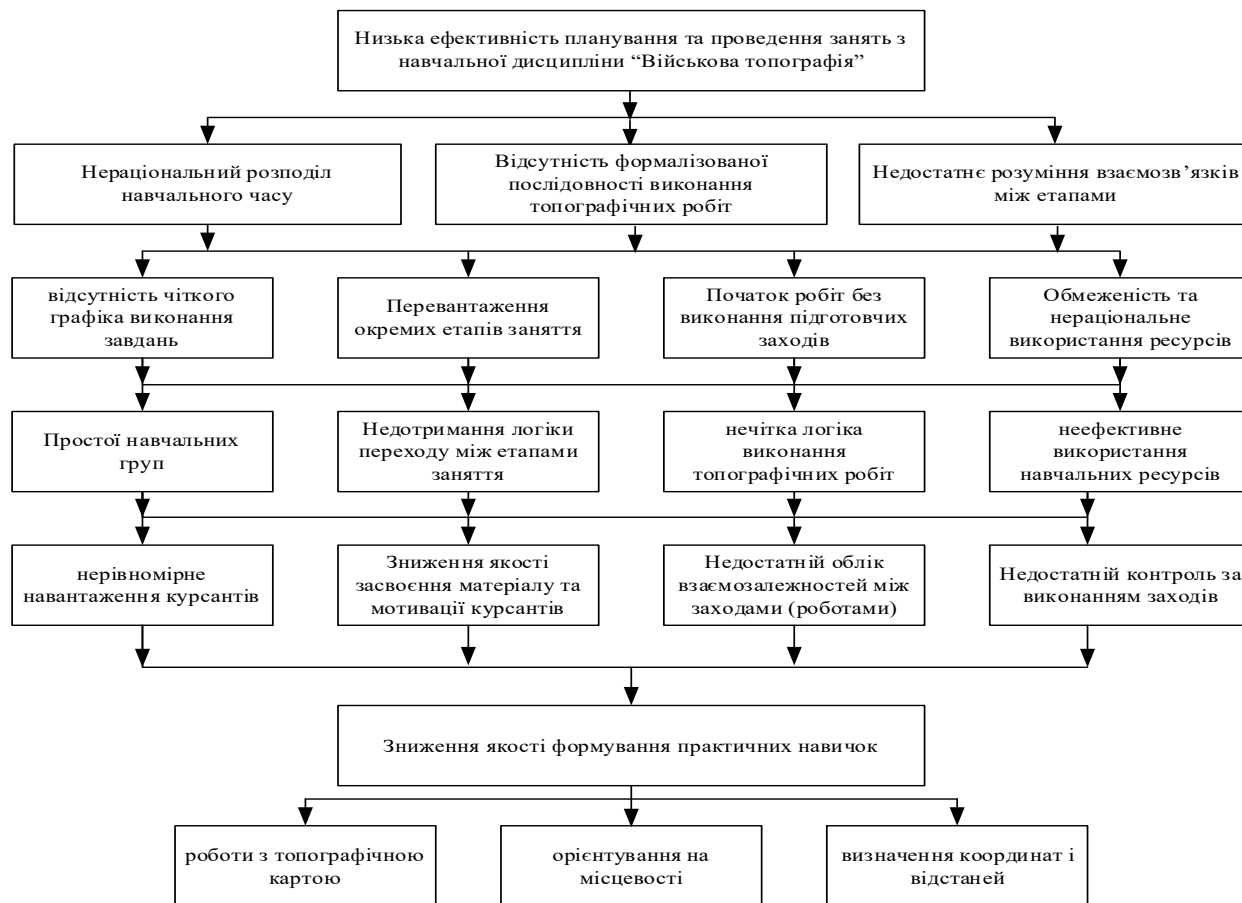


Рис. 1. Дерево проблем організації практичних занять із військової топографії
(розроблено авторами)

Значну увагу в цих публікаціях приділено змісту навчального матеріалу та методиці відпрацювання практичних нормативів під час підготовки військовослужбовців. У статті [6] висвітлено основи топографічної підготовки офіцерів загальновійськових та прикордонних підрозділів під час виконання бойових завдань. Автор зазначає, що набуті знання та навички з військової топографії дають змогу більш обґрунтовано оцінювати обстановку, приймати доцільні рішення та ефективніше організувати управління підрозділами. Наукова праця [7] присвячена вдосконаленню методики обґрунтування складу сил і засобів топогеодезичного забезпечення військ оперативного командування в мирний час.

Певні аспекти геодезичних і картографічних обчислень, застосування математичних і геоінформаційних методів у ході роботи з просторовими даними, геоінформаційних систем для вирішення завдань навігаційного забезпечення, а також дослідження застосування інструментів на основі технології штучного інтелекту для завдань топографічного картографування розглянуто в працях [8–13]. У зазначених дослідженнях висвітлено аспекти підвищення точності картометричних операцій, використання математичних методів у геодезичних розрахунках та застосування ГІС-технологій.

Водночас у галузі управління складними процесами та проектами широкого поширення набули методи мережевого планування й управління, зокрема метод

критичного шляху (Critical Path Method – CPM) та метод оцінювання і перегляду програм (Program Evaluation and Review Technique – PERT) [14–21]. У цих роботах розглянуто теоретичні основи дослідження операцій, методи оптимізації та практичні підходи до планування складних процесів у різних сферах діяльності.

Разом із тим проведений аналіз наукових джерел свідчить, що питання застосування методів мережевого планування під час організації та проведення практичних занять у вищих військових навчальних закладах (ВВНЗ), зокрема з дисципліни “Військова топографія”, висвітлено недостатньо. Здебільшого планування практичних занять здійснюється на основі традиційних методичних підходів, що не передбачають використання формалізованих методів аналізу тривалості виконання окремих етапів заняття та їх взаємозв’язків, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення науково-методичного підходу до планування та проведення практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” на основі застосування методів мережевого планування для підвищення ефективності використання навчального часу та організації навчального процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- 1) проаналізувати особливості організації та проведення практичних занять із дисципліни “Військова топографія” в системі підготовки військових фахівців;
- 2) визначити основні проблеми планування та виконання навчальних робіт під час проведення практичного заняття;
- 3) сформулювати дерево цілей дослідження, спрямоване на підвищення ефективності організації навчального процесу;
- 4) розробити структурну модель виконання навчальних робіт у ході проведення практичного заняття з використанням методів мережевого планування;
- 5) обґрунтувати можливість застосування мережевого графіка для оптимізації послідовності та тривалості виконання навчальних завдань.

Виклад основного матеріалу. Підвищення ефективності організації та проведення практичних занять із навчальної дисципліни “Військова топографія” потребує застосування сучасних методів планування освітнього процесу, які дозволяють чітко структурувати етапи заняття, визначити їх взаємозв’язки та оптимізувати час виконання окремих навчальних завдань. Одним із ефективних інструментів системного аналізу складних процесів є метод побудови дерева цілей, який дозволяє формалізувати структуру досягнення поставленої мети шляхом її декомпозиції на підцілі та конкретні завдання. Використання цього методу дає змогу визначити логічну послідовність виконання навчальних дій під час проведення практичного заняття, а також встановити взаємозалежності між окремими етапами роботи.

У контексті дослідження основною метою є організація ефективного проведення практичного заняття з військової топографії із застосуванням методів мережевого планування. Для її досягнення здійснено декомпозицію загальної мети на систему

взаємопов'язаних підцілей та завдань, що відображено у вигляді дерева цілей проведення практичного заняття з дисципліни “Військова топографія” із застосуванням методів мережевого планування (рис. 2).

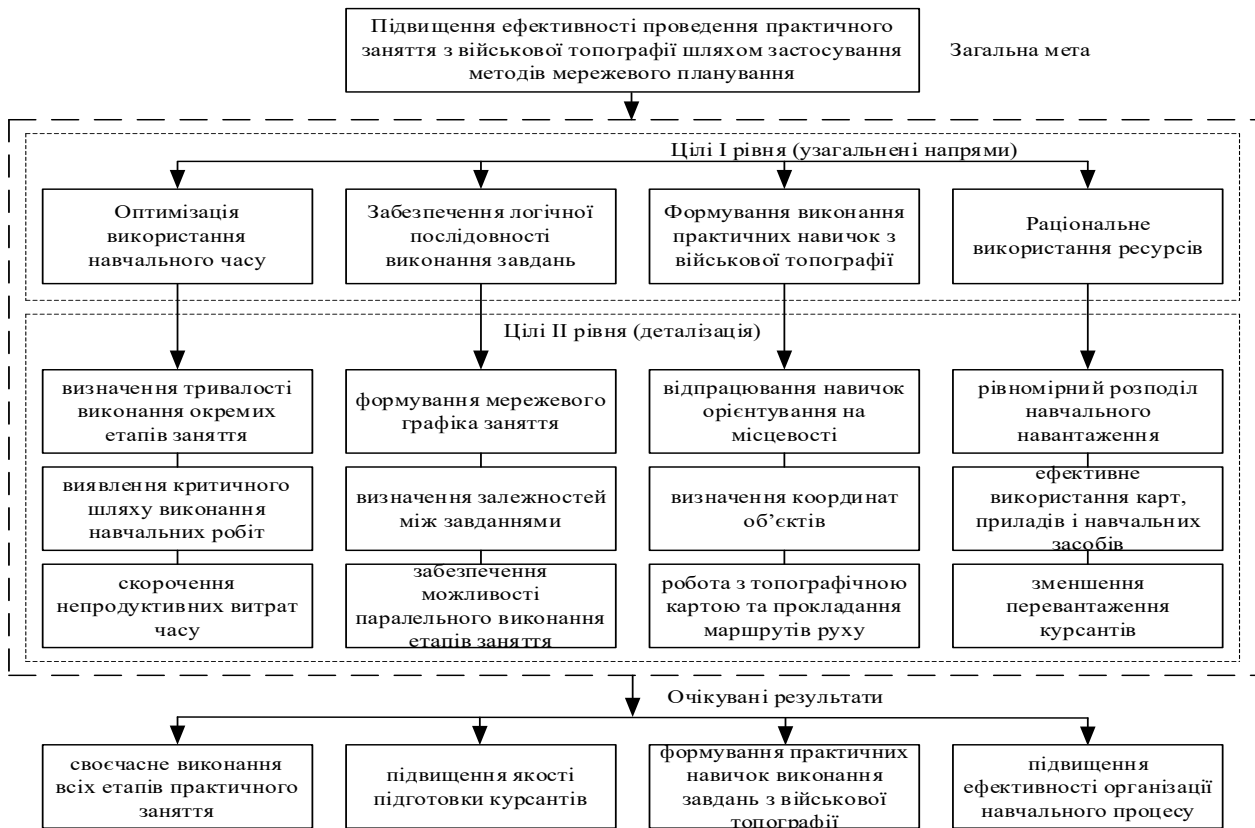


Рис. 2. Дерево цілей проведення практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” із застосуванням методів мережевого планування

Побудова структури цілей дослідження здійснюється з використанням ієрархічного підходу, що дозволяє систематизувати основні напрями підвищення ефективності проведення практичних занять із військової топографії та визначити взаємозв'язки між окремими складовими навчального процесу.

Запропонована структура відображає логічну декомпозицію загальної мети, яка полягає в підвищенні ефективності проведення практичного заняття з військової топографії шляхом застосування методів мережевого планування.

На першому рівні ієрархії сформовано основні напрями досягнення мети, зокрема: оптимізацію використання навчального часу, забезпечення логічної послідовності виконання завдань, формування практичних топографічних навичок та раціональне використання навчальних ресурсів.

Другий рівень дерева цілей деталізує зазначені напрями та конкретизує завдання, необхідні для їх реалізації, до них належать: визначення тривалості окремих етапів заняття, виявлення критичного шляху виконання навчальних робіт, формування мережевого графіка заняття, визначення залежностей між завданнями, відпрацювання навичок орієнтування на місцевості, роботи з топографічними картами та визначення координат об'єктів.

Нижній рівень структури відображає очікувані результати реалізації запропонованого підходу, серед яких своєчасне виконання всіх етапів практичного заняття, підвищення якості підготовки курсантів, формування практичних навичок виконання топографічних завдань та підвищення ефективності організації навчального процесу.

Отже, побудоване дерево цілей дозволяє формалізувати процес планування практичного заняття та створює методичну основу для подальшого застосування методів мережевого планування під час визначення структури занять, їх тривалості та послідовності виконання навчальних заходів.

Для формалізації процесу планування практичного заняття доцільно використати методи мережевого планування й управління, що дозволяють визначити послідовність, тривалість та критичний шлях виконання навчальних робіт.

Практичні заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” розглядаються як сукупність взаємопов’язаних навчальних занять (заходів / робіт). Застосування методів мережевого планування дозволяє формалізувати їх структуру у вигляді мережевого графіка, визначити критичний шлях виконання робіт, обчислити часові резерви, а також на основі мережевої моделі побудувати діаграму Ганта, яка наочно відображає послідовність, тривалість і можливість паралельного виконання навчальних завдань. Загальна тривалість заняття становить 180 хвилин (4 академічні години).

Перелік спланованих заходів виконання практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” відображений у табл. 1.

Таблиця 1

Перелік спланованих заходів виконання практичного заняття
з навчальної дисципліни “Військова топографія”

| Позначення роботи | Назва роботи | Тривалість, хв | Попередні роботи | Наступні роботи |
|-------------------|--|----------------|------------------|-----------------|
| 1→2 | Інструктаж із заходів безпеки, доведення мети заняття, навчальних питань, порядку виконання практичних завдань і вимог щодо організації роботи на місцевості | 5 | – | 2→3 |
| 2→3 | Орієнтування на місцевості та робота з топографічною картою | 35 | 1→2 | 3→4, 3→5 |
| 3→4 | Побудова маршрутів руху | 20 | 2→3 | 4→6 |
| 3→5 | Визначення координат об’єктів | 20 | 2→3 | 5→6 |
| 4→6 | Логічне об’єднання результатів виконання робіт | 0 | 3→4 | 6→7 |
| 5→6 | Логічне об’єднання результатів виконання робіт | 0 | 3→5 | 6→7 |
| 6→7 | Виконання практичних нормативів | 90 | 4→6, 5→6 | 7→8 |
| 7→8 | Підбиття підсумків заняття та оцінювання результатів | 10 | 6→7 | – |

У табл. 1 наведено перелік робіт практичного заняття, їх тривалість та логічні залежності між етапами виконання. Його структуру сформовано з урахуванням можливості паралельного виконання окремих топографічних завдань різними підгрупами курсантів. Для формалізації залежностей між паралельними роботами використано фіктивні роботи нульової тривалості.

Загальна тривалість практичного заняття становить 4 академічні години (180 хвилин).

На основі даних табл. 1 побудовано мережевий графік проведення практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” (рис. 3). Він відображає логічну послідовність виконання робіт, їх взаємозв’язки та можливість паралельного виконання окремих етапів.

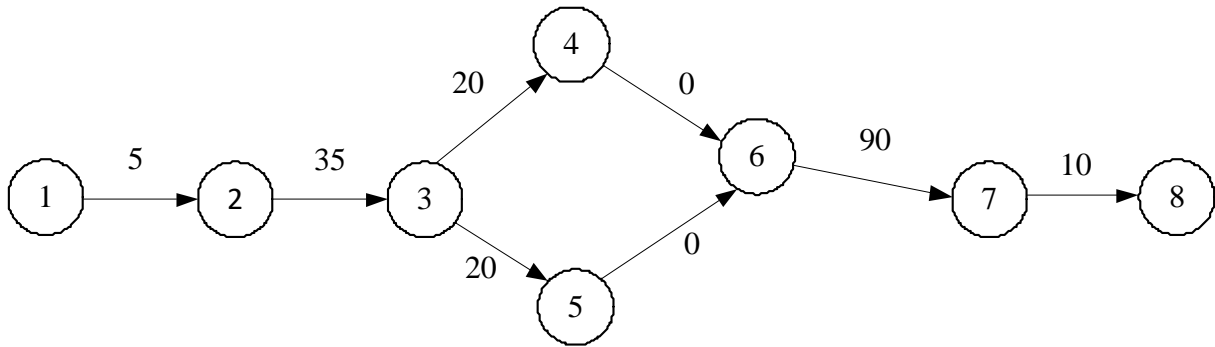


Рис. 3. Мережевий графік проведення практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія”

Аналіз графіка показав наявність двох рівнозначних критичних шляхів (1→2→3→4→6→7→8 та 1→2→3→5→6→7→8). Загальна тривалість критичного шляху становить 160 хвилин, що не перевищує встановлену тривалість заняття та дозволило забезпечити резерв часу у 20 хвилин, який використовується на етапі виконання робіт, що потребують доопрацювання.

Розрахунок критичного та інших параметрів мережевого графіка включає два етапи [21].

Під час *першого* етапу (визначення прямого ходу) обчислюються ранні строки стану подій $T_j^{(p)}$. При цьому ранній строк стану вихідної події дорівнює нулю $T_0^{(p)} = 0$.

Обчислення ранніх строків стану подій починається з вихідної події та проводиться в порядку зростання номерів вершин доти, доки не буде досягнуто заключної події.

Позначимо $t_{i,j}$ тривалість роботи (i,j) . Обчислення ранніх строків подій виконується за такою формулою [21]:

$$T_j^{(p)} = \max_{(i,j) \in V_j^+} \{T_i^{(p)} + t_{i,j}\}, \quad (1)$$

де V_j^+ – множина всіх операцій, які закінчуються подією j .

Під час *другого* етапу (визначення зворотного ходу) обчислюються пізні строки подій $T_i^{(n)}$ [21]. При цьому починаються обчислення з кінцевої події комплексу робіт.

Після визначення ранніх та пізніх строків подій знайдено резерви часу R_k , на який можна відкласти момент початку події, не перевищуючи загальний термін виконання комплексу робіт.

Чисельне значення резерву часу події обраховуємо за формулою [21]

$$R_k = T_k^{(n)} - T_k^{(p)}. \quad (2)$$

Для робіт обчислюємо такі параметри [21]:

- 1) $t_{ij}^{(pn)}$ – ранній початок робіт: $t_{ij}^{(pn)} = T_i^{(p)}$;
- 2) $t_{ij}^{(pz)}$ – раннє завершення роботи: $t_{ij}^{(pz)} = T_i^{(p)} + t_{i,j}$;
- 3) $t_{ij}^{(nz)}$ – пізнє завершення роботи: $t_{ij}^{(nz)} = T_j^{(n)}$;
- 4) $t_{ij}^{(nn)} = T_j^n - t_{i,j}$ – пізній початок;
- 5) $r_{ij}^{(n)}$ – повний резерв часу роботи, який визначаємо за такою формулою [21]:

$$r_{ij}^{(n)} = T_j^n - T_i^{(p)} - t_{i,j} = T_j^{(n)} - t_{ij}^{(pz)}. \quad (3)$$

Повний резерв показує, на яку величину відповідно до $T_i^{(p)}$ можна змістити початок роботи так, щоб не збільшити час виконання всього проєкту;

- 6) $r_{ij}^{(B)}$ – вільний резерв часу роботи, який обчислюємо в такий спосіб [21]:

$$r_{ij}^{(B)} = T_j^{(p)} - T_i^{(p)} - t_{i,j}. \quad (4)$$

Для оцінювання часових характеристик мережевого графіка проведено розрахунок ранніх і пізніх строків початку та завершення робіт, а також резервів часу на їх виконання. Результати розрахунку часових параметрів та резервів робіт мережевого графіка проведення заняття відображено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку часових параметрів та резервів робіт мережевого графіка проведення заняття

| Позначення роботи | Назва роботи | Тривалість роботи $t_{i,j}$, хв | Ранній початок роботи $t_{ij}^{(pn)}$, хв | Раннє завершення роботи $t_{ij}^{(pz)}$, хв | Пізній початок роботи $t_{ij}^{(nn)}$, хв | Пізнє завершення роботи $t_{ij}^{(nz)}$, хв | Повний резерв часу $t_{ij}^{(n)}$, хв |
|-------------------|--|----------------------------------|--|--|--|--|--|
| 1→2 | Інструктаж із заходів безпеки, доведення мети заняття, навчальних питань, порядку виконання практичних завдань і вимог щодо організації роботи на місцевості | 5 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 |
| 2→3 | Орієнтування на місцевості та робота з топографічною картою | 35 | 5 | 40 | 5 | 40 | 0 |
| 3→4 | Побудова маршрутів руху | 20 | 40 | 60 | 40 | 60 | 0 |

| | | | | | | | |
|-----|--|----|-----|-----|-----|-----|---|
| 3→5 | Визначення координат об'єктів | 20 | 40 | 60 | 40 | 60 | 0 |
| 4→6 | Логічне об'єднання результатів | 0 | 60 | 60 | 60 | 60 | 0 |
| 5→6 | Логічне об'єднання результатів | 0 | 60 | 60 | 60 | 60 | 0 |
| 6→7 | Виконання практичних нормативів | 90 | 60 | 150 | 60 | 150 | 0 |
| 7→8 | Підбиття підсумків заняття та оцінювання результатів | 10 | 150 | 160 | 150 | 160 | 0 |

У табл. 2 наведено результати розрахунку часових параметрів мережевого графіка проведення практичного заняття. Для кожної роботи визначено ранні та пізні строки початку та завершення, а також резерви часу.

Проведені розрахунки дозволили встановити критичний шлях виконання робіт і визначити мінімально можливу тривалість проведення практичного заняття. Встановлено, що всі роботи мережевого графіка належать до критичного шляху, оскільки їх резерви часу дорівнюють нулю.

Фіктивні роботи 4→6 та 5→6 мають нульову тривалість і використовуються лише для коректного відображення логічних залежностей між паралельними роботами та наступним етапом виконання практичних нормативів.

Розрахована тривалість критичного шляху становить 160 хвилин, що забезпечує резерв часу 20 хвилин у межах загальної тривалості заняття 180 хвилин. Зазначений резерв може бути використаний для організаційних переходів між навчальними місцями, коригування послідовності виконання робіт або компенсації можливих затримок під час проведення практичного заняття.

На основі мережевого графіка побудовано діаграму Ганта виконання заходів практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” (рис. 4). Вона дозволяє наочно відобразити послідовність, тривалість та паралельність виконання окремих етапів. Вона демонструє критичні роботи та часові резерви, що створює можливості для оптимізації навчального часу й раціонального розподілу особового складу та ресурсів, а також використовується як навчальний інструмент формування навичок планування заходів заняття.

Отже, у підсумку розроблено науково-методичний підхід до організації та планування практичних занять з навчальної дисципліни “Військова топографія” із застосуванням методів мережевого планування, що передбачає формалізацію структури заняття у вигляді мережевого графіка, визначення критичного шляху виконання робіт та оптимізацію використання навчального часу і ресурсів.

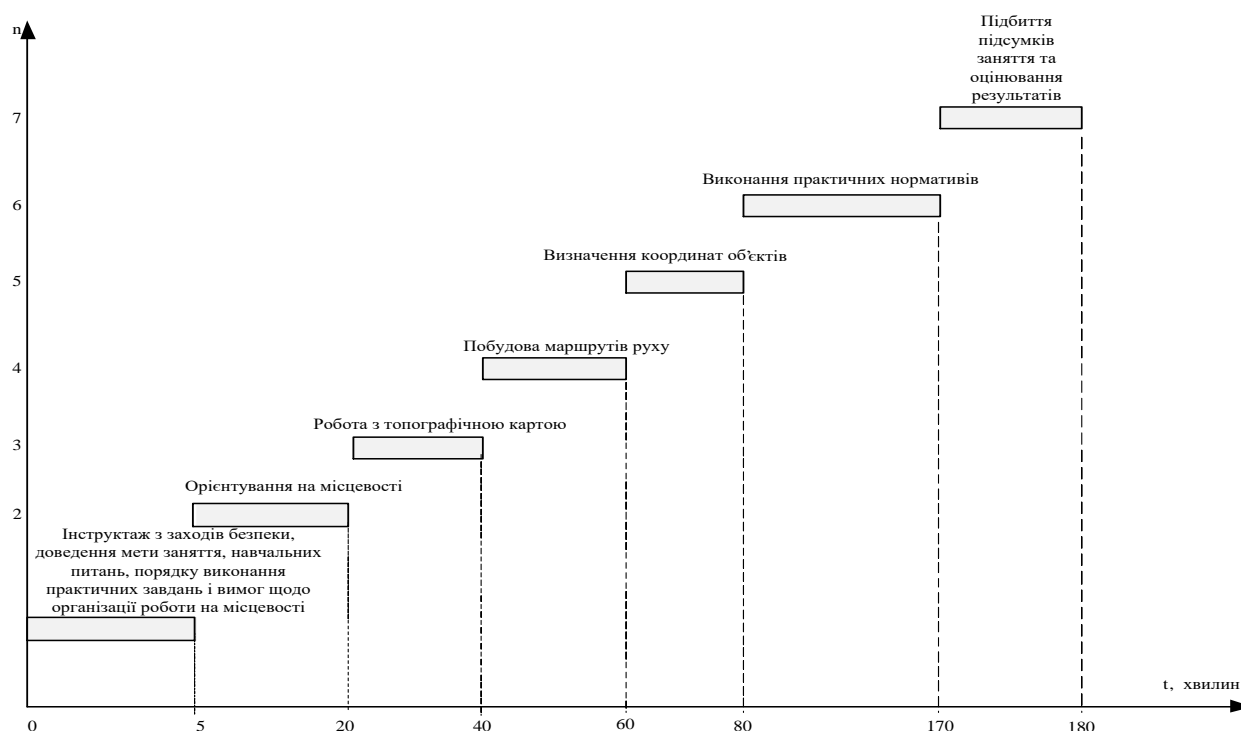


Рис. 4. Діаграма Ганта виконання заходів практичного заняття з навчальної дисципліни “Військова топографія” (розроблено авторами)

Висновки. Апробація запропонованого підходу під час проведення практичного заняття показала можливість скорочення непродуктивних витрат навчального часу та підвищення ефективності використання навчально-матеріальної бази. Застосування мережевого графіка та діаграми Ганта дозволяє підвищити рівень керованості навчального процесу, забезпечити паралельне виконання окремих завдань і скоротити непродуктивні витрати навчального часу. Цей підхід може бути корисним для планування та проведення практичних занять не лише з дисципліни “Військова топографія”, а й з інших військово-професійних дисциплін, де необхідно забезпечити раціональну організацію навчального процесу, ефективне використання навчального часу та ресурсів.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в застосуванні методів мережевого планування для формалізації структури практичного заняття з військової топографії та визначення критичного шляху виконання навчальних робіт.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення програмних засобів автоматизованого планування практичних занять у ВВНЗ та розширення застосування методів мережевого планування у військово-педагогічній практиці.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Військова топографія : підручник / С. Г. Шмаль, О. Г. Міхно, П. А. Савков та ін. Київ : ВІКНУ, 2016. 499 с.
2. Військова топографія. Базовий курс тактичного рівня L-1A : практич. посіб. / С. В. Гузченко, Р. Ю. Кушпета, Г. Б. Гишко, В. В. Пугач. Харків : ХНУПС, 2025. 92 с.

3. Основи бойового забезпечення військ. Книга II : навч. посіб. / С. В. Гузченко та ін. Харків : ХНУПС, 2019. 232 с.
4. Основні поняття військової топографії : довідник. Київ : КСП ЗС України, 2022. 113 с.
5. Практичне використання топографічних карт у світовій геодезичній системі WGS-84, картографічній проєкції Меркатора (UTM), системі цілеуказання MGRS : метод. посіб. Київ : КСП ЗС України, 2024. 41 с.
6. Братко А. Основи топографічної підготовки офіцерів загальновійськових та прикордонних підрозділів // Зб. наук. праць Нац. держ. прикордонної служби України. 2020. № 81 (3). С. 7–17. <https://doi.org/10.32453/3.v81i3.434>
7. Булгаков А. Удосконалена методика обґрунтування складу сил і засобів топогеодезичного забезпечення військ оперативного командування у мирний час // Зб. наук. праць Центру воен.-стратег. досліджень. Нац. ун-ту оборони України ім. Івана Черняхівського. 2021. № 3 (73). С. 116–122. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2021-3-73/116-122>
8. Карпінський Ю. О., Кінь Д. О. Дослідження картометричних операцій в середовищі ГІС // Містобудування та територіальне планування. 2018. № 68. С. 706–711. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7068> (дата звернення: 12.02.2026).
9. Кінь Д. О. Щодо підвищення точності аналітичних та чисельних методів геодезичних та картографічних операцій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2024. № I (47). С. 149–160. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-149-160>
10. Lytvynenko N., Korenets O. Technology of Using Three-Dimensional Models of Location in the Unified Geoinformation Environment of the Armed Forces of Ukraine // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences. 2023. № 3 (55). P. 62–65. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2023.55.62-65>
11. Lukiyanichuk A., Miroshnichenko O. Application of Geoinformation Systems for the Solving Tasks of Navigation Support for the Armies // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences. 2022. № 3 (51). P. 85–87. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2022.51.85-87>
12. Bulhakov A. Development of Recommendations Regarding the Composition of Forces and Equipment for Topogeodesic Support of the Troops of the Operational Command // Technology Audit and Production Reserves. 2022. Vol. 4. № 2 (66). P. 29–32. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.262792>
13. Лазоренко Н. Дослідження застосування інструментів на основі технології штучного інтелекту для завдань топографічного картографування // Просторовий розвиток. 2024. № 8. С. 430–443. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.430-443>
14. Назар Ю. С., Придатко О. В. Моделювання процесу обходу мережевого графа для розв'язання задач короткострокового планування ІТ-проектів // Вісник Львівського держ. ун-ту безпеки життєдіяльності. 2024. № 29. С. 32–43. <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.04>
15. Неклонський І. М., Рагімов С. Ю., Новожилова М. В. Аналіз оперативних дій рятувальних формувань за допомогою методу мережевого планування // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 2 (34). С. 168–181. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-13>

16. Мережеве планування та комбінаторна оптимізація у фізичній підготовці військовослужбовців для корекції маси тіла / В. С. Поплавець, С. С. Бойко, О. Д. Корнієнко та ін. // Науковий часопис Українського держ. ун-ту ім. Михайла Драгоманова. 2025. Вип. 10 (197). С. 188–192. [https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2025.10\(197\).34](https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2025.10(197).34)
17. Кузьмичов А. І. Планування та управління проектами. Моделювання засобами MS Excel : практикум. Київ : Вид-во «Ліра-К», 2017. 180 с.
18. Яцько О. М., Томка Ю. Я. Дослідження операцій та теорія ігор : навч.-метод. посіб. Чернівці : Технодрук, 2023. 392 с.
19. Малярець Л. М., Лебедева І. Л., Норік Л. О. Дослідження операцій та методи оптимізації : практикум. Ч. II. Харків : ХНЕУ, 2019. 161 с.
20. Дослідження операцій : навч. посіб. (для студентів напрямку підготовки 0306 – “Менеджмент і адміністрування”) / За ред. В. І. Оспіщева. Харків : ХНАМГ, 2008. 136 с.
21. Поплавець С. І., Гузченко С. В., Чернявський О. Ю., Хомазюк О. Г. Методи мережевого планування в організації інженерної підготовки курсантів // Системи обробки інформації. 2026. № 1 (184). С. 83–90. <https://doi.org/10.30748/soi.2026.184.08>

Стаття надійшла до редакції 16.03.2026.

Прийнято до друку 14.05.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Shmal, S. H., Mikhno, O. H., & Savkov, P. A., et al. (2016). *Viiskova topohrafiia [Military Topography]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Huzchenko, S. V., Kushpeta, R. Yu., Hyshko, H. B., & Puhach, V. V. (2025). *Viiskova topohrafiia. Bazovyi kurs taktychnoho rivnia L-1A [Military Topography: Basic Tactical Level Course L-1A]*. Kharkiv [in Ukrainian].
3. Huzchenko, S. V., et al. (2019). *Osnovy boiovoho zabezpechennia viisk. Knyha II: navch. posib. [Fundamentals of Combat Support of Troops. Book II]*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. *Osnovni poniattia viiskovoi topohrafii: dovidnyk [Basic Concepts of Military Topography]*. (2022). Kyiv [in Ukrainian].
5. *Praktychne vykorystannia topohrafichnykh kart u svitovii heodezychnii systemi WGS-84, kartohrafichnii proieksii Merkatora (UTM), systemi tsileukazannia MGRS: metod. posib. [Practical Use of Topographic Maps in the WGS-84 Geodetic System, Mercator Projection (UTM), and MGRS Coordinate System: methodical manual]*. (2024). Kyiv [in Ukrainian].
6. Bratko, A. (2020). *Osnovy topohrafichnoi pidhotovky ofitseriv zahalnoviiskovykh ta prykordonnykh pidrozdiliv [Fundamentals of Topographic Training of Officers of Combined Arms and Border Guard Units]*. *Zb. nauk. prats Nats. derzh. prykordonnoi sluzhby Ukrainy [Collection of Scientific Works of the National State Border Service of Ukraine]*, 81 (3), 7–17. <https://doi.org/10.32453/3.v81i3.434> [in Ukrainian].
7. Bulhakov, A. (2021). *Udoskonalena metodyka obgruntuvannia skladu syl i zasobiv*

topoheodezychnoho zabezpechennia viisk operatyvnoho komanduvannia u myrnyi chas [Improved methodology for substantiating the composition of forces and means of topogeodetic support of troops of operational command in peacetime]. *Zb. nauk. prats Tsentru voien.-strateg. doslidzhen Nats. un-tu oborony Ukrainy im. Ivana Cherniakhovskoho [Collection of Scientific Works of the Center for Military-Strategic Research. National University of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky]*, 3 (73), 116–122. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2021-3-73/116-122> [in Ukrainian].

8. Karpinskyi, Yu. O., & Kin, D. O. (2018). Doslidzhennia kartometrychnykh operatsii v seredovyshti HIS [Research of Cartometric Operations in the GIS Environment]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia [Urban Planning and Territorial Planning]*, 68, 706–711. Retrieved from <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7068> [in Ukrainian].

9. Kin, D. O. (2024). Shchodo pidvyshchennia tochnosti analitychnykh ta chyselnykh metodiv heodezychnykh ta kartografichnykh operatsii [On Improving the Accuracy of Analytical and Numerical Methods of Geodetic and Cartographic Operations]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva [Modern Achievements of Geodetic Science and Production]*, 1 (47), 149–160. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-149-160> [in Ukrainian].

10. Lytvynenko, N., & Korenets, O. (2023). Technology of Using Three-Dimensional Models of Location in the Unified Geoinformation Environment of the Armed Forces of Ukraine. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences*, 3 (55), 62–65. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2023.55.62-65>

11. Lukiyanchuk, A., & Mirosnichenko, O. (2022). Application of Geoinformation Systems for the Solving Tasks of Navigation Support for the Armies. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences*, 3 (51), 85–87. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2022.51.85-87>

12. Bulhakov, A. (2022). Development of Recommendations Regarding the Composition of Forces and Equipment for Topogeodesic Support of the Troops of the Operational Command. *Technology Audit and Production Reserves*, 4, 2 (66), 29–32. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.262792>

13. Lazorenko, N. (2024). Doslidzhennia zastosuvannia instrumentiv na osnovi tekhnolohii shtuchnoho intelektu dlia zavdan topografichnoho kartografuvannia [Research on the application of artificial intelligence-based tools for topographic mapping tasks]. *Prostorovy rozvytok [Spatial Development]*, 8, 430–443. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.430-443> [in Ukrainian].

14. Nazar, Yu. S., Prydatko, O. V. (2024). Modeliuvannia protsesu obkhodu merezhevoho hrafa dlia rozviazannia zadach korotkostrokovoho planuvannia IT-proiektiv [Modeling the Process of Traversing a Network Graph for Solving Short-Term IT Project Planning Tasks]. *Visnyk Lvivskoho derzh. un-tu bezpeky zhyttiediialnosti [Bulletin of the Lviv State University of Life Safety]*, 29, 32–43. <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.04> [in Ukrainian].

15. Neklonskyi, I. M., Rahimov, S. Yu., & Novozhylova, M. V. (2021). Analiz operatyvnykh dii riatsuvalnykh formuvan za dopomohoiu metodu merezhevoho planuvannia [Analysis of Operational Actions of Rescue Units Using the Network Planning Method]. *Problemy*

nadzvychnykh sytuatsii [Problems of emergency situations], 2 (34), 168–181. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-13> [in Ukrainian].

16. Poplavets, V. S., Boiko, S. S., & Korniienko, O. D., et al. (2025). Merezheve planuvannia ta kombinatorna optymizatsiia u fizychnii pidhotovtsi viiskovosluzhbovtsiv dlia korektsii masy tila [Network Planning and Combinatorial Optimization in Physical Training of Military Personnel for Body Weight Correction]. *Naukovyi chasopys Ukrainskoho derzh. un-tu im. Mykhaila Drahomanova [Scientific Journal of the Ukrainian State University named after Mykhailo Dragomanov]*, 10 (197), 188–192. [https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2025.10\(197\).34](https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series15.2025.10(197).34) [in Ukrainian].

17. Kuzmychov, A. I. (2017). *Planuvannia ta upravlinnia proiektamy. Modeliuvannia zasobamy MS Excel [Project Planning and Management. Modeling Using MS Excel]*. Kyiv [in Ukrainian].

18. Yatsko, O. M., & Tomka, Yu. Ya. (2023). *Doslidzhennia operatsii ta teoriia ihor. [Operations Research and Game Theory]*. Chernivtsi [in Ukrainian].

19. Maliarets, L. M., Lebedieva, I. L., & Norik, L. O. (2019). *Doslidzhennia operatsii ta metody optymizatsii. Ch. II. [Operations Research and Optimization Methods. Part II]*. Kharkiv [in Ukrainian].

20. *Doslidzhennia operatsii [Operations Research]*. (2008). Kharkiv [in Ukrainian].

21. Poplavets, S. I., Huzchenko, S. V., Cherniavskiy, O. Yu., & Khomaziuk, O. H. (2026). Metody merezhevoho planuvannia v orhanizatsii inzhenernoi pidhotovky kursantiv [Methods of Network Planning in Organizing Engineering Training of Cadets]. *Systemy obrobky informatsii [Information Processing Systems]*, 1 (184), 83–90. <https://doi.org/10.30748/soi.2026.184.08> [in Ukrainian].

S. I. Poplavets, O. Yu. Cherniavskiy, I. A. Sampir

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ORGANIZATION AND CONDUCT OF PRACTICAL CLASSES IN MILITARY TOPOGRAPHY USING NETWORK PLANNING METHODS

The article develops and substantiates a scientific and methodological approach to the organization and conduct of practical classes in military topography based on the application of network planning methods. The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of training time usage, ensure rational allocation of resources, and enhance the practical training of cadets in higher military educational institutions. It has been established that traditional approaches to lesson planning do not sufficiently take into account the interrelationships between the stages of educational activities, the possibility of their parallel execution, and the availability of time reserves, which leads to inefficient use of time and training resources.

The practical class is considered as a set of interrelated activities limited in time and resources. To formalize the structure of the class, network planning methods and the critical path method were applied. Within the framework of the study, a problem tree and a goal tree were developed, a network schedule of the practical class was constructed, the critical path was identified, and the time parameters and reserves of activities were calculated. A Gantt chart was created to visually represent the sequence and parallel execution of educational tasks.

The proposed approach involves dividing cadets into subgroups with the parallel performance of individual topographic tasks, which ensures a reduction in unproductive time losses, increases the efficiency of the use of training facilities, and improves the manageability of the educational process. It has been established that the application of network planning methods makes it possible to optimize the structure of the practical class, preliminarily assess the duration of activities, and improve the efficiency of organizing cadets' practical training.

The scientific novelty of the study lies in the development of a scientific and methodological approach to organizing practical classes in military topography based on network planning methods with the determination of the critical path and time parameters of activities. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the proposed approach during the planning and conduct of practical classes in order to improve the efficiency of organizing the educational process and ensure the rational use of training time and resources.

Keywords: *Gantt chart; Military Topography; network diagram; network planning; practical classes; scientific-methodological approach.*

О. Л. Сидорчук, канд. техн. наук, доц.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0000-0002-8767-9129>

В. Й. Залевський
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова
<https://orcid.org/0000-0003-1861-6084>

В. Г. Ципоренко, канд. техн. наук, доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»
<http://orcid.org/0000-0002-6843-8960>

УРАХУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ВІД ПОЗАМЕЖНИХ ПЕРЕРІЗІВ РУПОРНИХ ОПРОМІНЮВАЧІВ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Статтю присвячено дослідженню перевипроміненої від опромінювачів фазованих антенних решіток електромагнітної енергії із визначенням усіх коефіцієнтів відбиття від рупорних опромінювачів та врахуванням коефіцієнтів відбиття від їх позамежних перерізів.

З'ясовано, що перевагою застосування рупорних антен є висока спрямованість їх випромінювання, значний коефіцієнт корисної дії та досить високий коефіцієнт підсилення. Проте їх основним недоліком є зворотне випромінювання (розсіювання) електромагнітних хвиль елементами конструкції антени. Це впливає на радіолокаційну помітність зразків озброєння і військової техніки та їх електромагнітну сумісність.

Для усунення зазначених недоліків у статті проаналізовано характеристики діаграм зворотного розсіювання рупорних опромінювачів, що входять до складу фазованих антенних решіток з урахуванням коефіцієнтів відбиття від їх позамежних перерізів.

Запропоновано вдосконалений математичний апарат розрахунку електромагнітного поля, перевипроміненого антенною решіткою, що складається з рупорних опромінювачів пірамідальної форми для випадку нормальної поляризації електромагнітної хвилі до площини її падіння. Його новизною є врахування коефіцієнтів відбиття від позамежних перерізів рупорних опромінювачів, що входять до складу фазованих антенних решіток.

У ході дослідження з'ясовано причини та закономірності такого явища, як відбиття електромагнітних хвиль від внутрішніх неоднорідностей рупорних антен і місця стикування хвилеводу з рупором, а також обґрунтовано врахування коефіцієнтів відбиття від їх позамежних перерізів. Це дозволить зменшити коефіцієнт стоячої хвилі за напругою та знизити рівень бічних пелюсток. Отже, до зондувальної радіолокаційної станції надійде відбитий сигнал зниженого рівня, що дозволить покращити

розвідзахищеність зразків озброєння, до складу яких входить рупор як окрема антена або в складі фазованих антенних решіток.

***Ключові слова:** пірамідальний рупорний випромінювач; коефіцієнт відбиття; фазована антенна решітка; позамежний переріз; ефективна поверхня (площа) розсіювання.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні зразки озброєння та військової техніки (ОВТ) протиповітряної оборони (ППО) у своєму складі мають значну кількість антен. Для їх удосконалення і покращення тактико-технічних характеристик (ТТХ) найчастіше проводять заміну звичайних антен на більш досконалі шляхом упровадження фазованих антенних решіток (ФАР) [1–3].

Це підвищує коефіцієнт підсилення, а відповідно – і дальність дії, сприяє збільшенню кількості цілей (об'єктів пеленгації) тощо. Останні дослідження переважно спрямовано на заміну їх патч-антенами МІМО, проте залежно від завдання залишається проблема покращення ТТХ саме рупорних антен у складі ФАР. Головною їх перевагою є висока спрямованість випромінювання, достатньо великий коефіцієнт корисної дії та можливість генерувати надпотужні електромагнітні хвилі. Такі показники, у порівнянні з патч-антенами МІМО, визначають місце застосування рупорних антен як опромінювачів ФАР [4]. Це може бути космічна галузь, ППО, наземна техніка радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби, де основною вимогою є випромінювання високої потужності.

Однак у рупорних антен є і багато недоліків, серед яких виникнення зворотного розсіювання в область простору за рупором, зумовлене перевипромінюванням електромагнітних хвиль струмами, наведеними в контурі кромки розкриву рупора, а отже, до прояву задніх пелюсток діаграми спрямованості антени та діаграми її розсіювання в передню півсферу. Також розсіювання виникає і на інших елементах антени. Такі недоліки впливають на радіолокаційну помітність зразків ОВТ та їхню електромагнітну сумісність [5–8].

Для усунення або суттєвого зменшення зазначених вище недоліків необхідно проаналізувати характеристики діаграм розсіювання антен з метою покращення математичної моделі дослідження з урахуванням коефіцієнтів відбиття від позамежних перерізів рупорних опромінювачів ФАР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження характеристик розсіювання (вторинного випромінювання) електромагнітного поля від повітряних та наземних об'єктів займає важливе місце в радіолокації та радіонавігації. Іноді при цьому мають на увазі їх радіолокаційну помітність, яка потребує зниження, оскільки від цього залежить живучість зразка ОВТ. Показником, за яким оцінюють помітність об'єкта, є його ефективна поверхня (площа) розсіювання (ЕПР).

Розсіювання елементами конструкції рупорних антен, що входять до складу ФАР, у загальному випадку аналізувати складно.

Елементом рупорних антенних решіток є хвилеводи. Велику кількість наукових робіт присвячено хвилеводам із рупорним переходом. Проте визначення електродинамічних характеристик такого переходу передбачає складні розрахунки. Так, у роботах [8–11],

розглянуто підхід, що ґрунтується на моделі ступінчатого переходу рупора із застосуванням методу проєкційного зшивання полів. У [12] запропоновано метод узагальненої матриці розсіювання. У публікаціях [13–14] розглянуто метод поперечних перерізів, а в [15–16] – метод інваріантного занурення. Усі вони пов’язані з розв’язанням задач дифракції на неоднорідних поверхнях.

Аналіз диференціальних задач на поверхні рупорних антен ФАР доцільно проводити в ході розгляду різних причин розсіювання, що здебільшого зумовлено [17, 18]:

- неузгодженням поляризацій первинного поля і поля антени;
- розсіюванням у «зворотну» півсферу;
- затіненням, що вноситься самою антеною;
- розкритом антени внаслідок незбігу розподілу в розкритті полів хвиль, що падають зовні (у режимі приймання) і всередині (в режимі передавання);
- відбиттям від приймача;
- розсіюванням на гострих кромках антени та на зовнішніх елементах її конструкції.

Для рупорних антен можна визначити форму діаграми частини зворотного розсіювання [19, 20], що зумовлено незбігом у розкритті антени розподілень первинного поля (у режимі приймання) і поля в антені поблизу розкриття (що найчастіше збігається з розподіленням, збудженим у режимі передавання основної хвилі одномодового фідера). При цьому розподіл первинного поля в розкритті розкладається за системою особистих парціальних хвиль рупора. Основна із цих хвиль використовується у фідерному тракті (хвилеводі), їй відповідає поглинальна потужність, якщо хвилевод узгоджений із трактом. На решту хвиль (оскільки є й інші джерела зворотного розсіювання) також припадає частина потужності. Кожна з таких вищих хвиль відбивається всередині рупора та перевипромінюється, як і в разі збудження рупора відповідною гармонікою.

Якщо рупорна антена опромінюється в секторі головної пелюстки її діаграми спрямованості, а приймальний тракт повністю неузгоджений із антеною, то потужність, що проходить у тракт, буде повністю відбиватися.

Під час досліджень явищ розсіювання або перевипромінювання хвилі від ФАР її розглядають як групу опромінювачів, що є сукупністю блискучих точок. У такому разі задача знаходження інтегральної та диференціальної поверхонь розсіювання зводиться до розрахунку ЕПР групи її опромінювачів, на розкритті кожного з яких наводяться поверхневі струми і відбувається збудження амплітуд напруженості електромагнітного поля [5–7]. У попередніх дослідженнях недостатньо уваги приділялося вивченню усіх коефіцієнтів відбиття від ФАР та аналізу характеристик розсіювання антен для покращення їх математичної моделі.

Формулювання завдання дослідження. З урахуванням викладеного вище на сьогодні потребує уточнення:

вираз для розсіяного поля від розкриття без урахування внеску «паразитних» хвиль та з ним;

визначення коефіцієнтів відбиття для хвиль електричного й магнітного типу від розкриття рупора, за умови узгодження з хвильовим опором вільного простору;

врахування відбиття хвиль основного типу від місця стикування хвилеводу з рупором;

дослідження коефіцієнтів відбиття від позамежних перерізів рупорних опромінювачів, що входять до складу ФАР.

Виходячи з цього, **метою статті** є покращення математичної моделі дослідження перевипроміненої від рупорних опромінювачів ФАР електромагнітної енергії з урахуванням усіх коефіцієнтів відбиття, зокрема від їх позамежних перерізів. Необхідно дослідити один із випадків довільного падіння електромагнітної хвилі на антену, а саме нормальної поляризації електромагнітної хвилі до площини її падіння.

Виклад основного матеріалу

1. *Розрахунок коефіцієнтів відбиття від розкриву для хвиль магнітного та електричного типу.* Дослідження перевипроміненої від ФАР електромагнітної енергії необхідно починати з визначення поля, відбитого від одного випромінювача (рис. 1), що входить до складу такої решітки, наприклад, рис. 2 [14].

Розглянемо випадок, коли електромагнітна хвиля, що падає на антену, поляризована нормально до площини падіння, тобто площина поляризації хвилі та площина падіння взаємно перпендикулярні.

Такі дослідження поля, відбитого (розсіяного) розкривом \vec{E}_{pp} одного або n -го випромінювача антенної решітки, у разі падіння на неї хвилі довільної форми від заданих джерел, асимптотичними методами із застосуванням леми Лоренца було проведено в [5, 6].

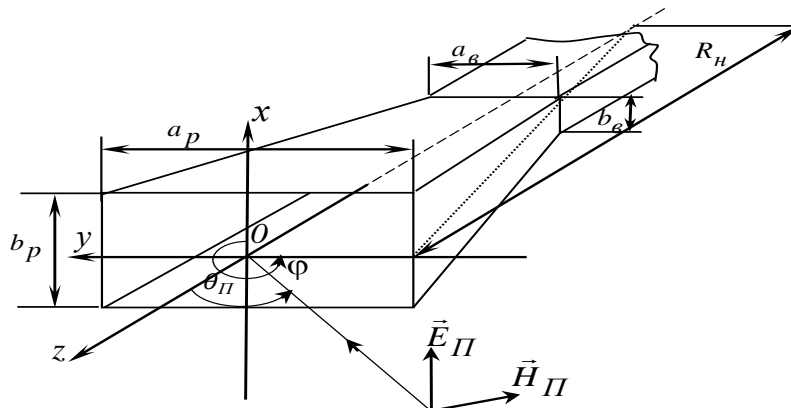


Рис. 1. Параметри хвилеводу для розрахунку розсіяного поля в разі падіння нормально поляризованої хвилі

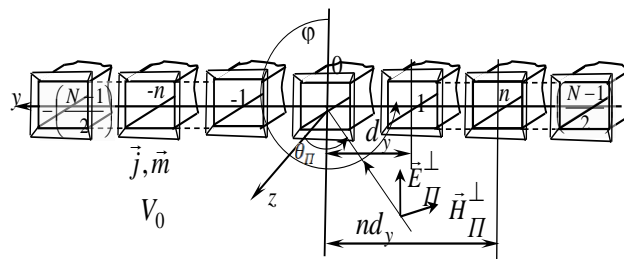


Рис. 2. Параметри лінійки рупорних опромінювачів для розрахунку розсіяного поля в разі падіння плоскої електромагнітної хвилі, нормально поляризованої до площини падіння

Математична модель розрахунку такого поля має такий вигляд:

$$\vec{E}_{pp} = \frac{\vec{e}_p}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \left\{ \int_{S_p} \int \left[\sum_{n=1}^{\infty} [\vec{A}_{+n} E_{+n} (1 + \rho_{-n})] e^{i(k_x x + k_y y)} - E_{v\tau} e^{i(k_x x + k_y y)} \right] dx dy \right\} \times e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y, \quad (1)$$

де S_p – поверхня інтегрування розкриву n -го випромінювача (рис. 2) із внутрішньої сторони;

\vec{e}_p – одиничний вектор напруженості електромагнітного поля;

\vec{A}_{+n} – спектральна функція комплексних амплітуд плоских хвиль, що збуджуються на розкриві;

E_{+n} – вектор напруженості електромагнітного поля, що падає на n -й випромінювач;

k_x, k_y, k_z – проєкції хвильового вектора на осях x, y, z ;

$E_{v\tau}$ – вектор напруженості електромагнітного поля після врахування граничних умов і доповнення інтегрування до нескінченних меж поза поверхнею S_p ;

ρ_{-n} – коефіцієнт відбиття від внутрішніх неоднорідностей n -го випромінювача.

Для випадку нормальної поляризації хвилі, що падає перпендикулярно до площини її падіння (рис. 1), після підстановки у вираз (1) власних функцій [13] й інтегрування їх по осі x та у тангенціальна складова поля $\vec{E}_{pp\tau}^{\perp}$ дорівнюватиме

$$\vec{E}_{pp\tau}^{\perp} = -\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \left\{ \frac{b_p \sin\left(\frac{k_x b_p}{2}\right)}{\frac{k_x b_p}{2}} \sum_{n=1}^{\infty} A_{+n}^{\perp} \left(\frac{n\pi}{a_p}\right)^2 \frac{\sin^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a_p}{2}\right) - i \cos^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k_y a_p}{2}\right)}{\left(\frac{n\pi}{a_p}\right)^2 - (k_y)^2} + E_0 a_p \frac{\sin\left(\frac{a_p}{2}(k_y - k \sin \theta_{II})\right)}{\frac{a_p}{2}(k_y - k \sin \theta_{II})} \right\} \times e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y, \quad (2)$$

де a_p та b_p – розміри розкриву прямокутного n -го рупорного випромінювача (рис. 1);

E_0 – потужність випромінювання;

$\sum_{n=1}^{\infty} A_{+n}^{\perp}$ – сума мод (типів хвиль) амплітуд магнітного типу;

n – ціле число $0, 1 \dots n$;

θ_{II} – кут падіння плоскої електромагнітної хвилі.

Для хвиль інших типів вираз буде аналогічним, але з урахуванням хвильового опору вільного простору.

Коефіцієнти відбиття від розкриву рупора визначимо за умови узгодження двох ліній передач із хвильовим опором $Z_0 = 120\pi$ Ом (опір вільного простору) і Z_B (хвильовий опір розкриву рупора) [10, 12].

Хвильовий опір розкриву рупора опишемо як співвідношення тангенціальних складових електричного й магнітного полів хвилеводу з розмірами розкриву. Тоді визначення хвильового опору справедливе не тільки для основного, але й для довільного типу хвилі [13–15].

Коефіцієнти відбиття від розкриву для хвиль магнітного та електричного типу визначаємо в такий спосіб:

$$\rho_{+mn}^H = \frac{Z_0 - Z_{Bmn}^H}{Z_0 + Z_{Bmn}^H} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2b_p}\right)^2 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} - 1}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2b_p}\right)^2 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} + 1}, \quad (3)$$

$$\rho_{+mn}^E = \frac{Z_0 - Z_{Bmn}^E}{Z_0 + Z_{Bmn}^E} = -\rho_{+mn}^H, \quad (4)$$

де m, n – кількість стоячих півхвиль, які вкладаються по сторонах x та y .

Вираз для розсіяного поля від розкриття без урахування внеску «паразитних» хвиль із формули (2) для випадку, наприклад, $\theta = \theta_{II}$, $\varphi = \varphi_{II} = \frac{3\pi}{2}$ та з урахуванням сферичної системи координат

$$x = r \sin \theta \cos \varphi, \quad y = r \sin \theta \sin \varphi, \quad z = r \cos \varphi$$

запишемо в такому вигляді:

$$E_{rppx}^\perp \approx E_0 \frac{a_p b_p}{r \lambda} \cos \theta \frac{8}{\pi^2} (1 + \cos \theta) e^{-i(kr - \frac{\pi}{2})} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \dot{K}_{pn} D_n^\perp(\theta) (1 + \dot{\rho}_{-n}^H) - \frac{\pi^2}{8(1 + \cos \theta)} \sin \left(2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta \right) \frac{1}{2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta} \right\}, \quad (5)$$

де

$$\dot{K}_{pn} = \frac{1}{\left(n^2 \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} \right) (1 + \dot{\rho}_{-n} \dot{\rho}_{+n}) \right)}, \quad (6)$$

$$D_n^\perp(\theta) = \frac{\sin^4\left(\frac{n\lambda}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta\right) - \cos^4\left(\frac{n\lambda}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(1 - \left(\frac{2a_p}{n\lambda} \sin \theta\right)^2\right)^2}, \quad (7)$$

$$\rho_{+n} = \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} - 1 \right) \frac{1}{\left(\sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} + 1 \right)}. \quad (8)$$

Якщо врахувати внесок «паразитних» хвиль, то для розсіяного поля матимемо

$$E_{rppx}^\perp \approx E_0 \frac{a_p b_p}{r \lambda} \cos \theta \frac{8}{\pi^2} (1 + \cos \theta) e^{-i(kr - \frac{\pi}{2})} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} K_{pn} \left[D_n^\perp(\theta) (1 + \dot{\rho}_{-n}^H) + \sum_{p=3}^{\infty} \dot{K}_{snp} B_{np} e^{-i2y_p} \right] - \frac{\pi^2}{8(1 + \cos \theta)} \frac{\sin\left(2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta\right)}{2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta} \right\}, \quad (9)$$

де

$$\dot{K}_{snp} = \frac{-tg\theta_{0H}n^2(1+\cos n\pi \cos p\pi)}{\left(\frac{ap}{\lambda}\right)^3 8\pi \sqrt{1-\left(\frac{p\lambda}{2ap}\right)^2} \left(\sqrt{1-\left(\frac{n\lambda}{1ap}\right)^2}\right) \left(\sqrt{1-\left(\frac{p\lambda}{1ap}\right)^2}\right)}, \quad (10)$$

$$B_{np} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi p}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi ap}{\lambda} \sin \theta\right) - \cos^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi p}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi ap}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(1-\left(\frac{2ap}{p\lambda} \sin \theta\right)^2\right) \left(1-\left(\frac{2ap}{n\lambda} \sin \theta\right)^2\right)}, \quad (11)$$

$$\gamma_p = \frac{p\pi}{2tg\theta_{0H}} \left[\sqrt{\left(\left(\frac{2ap}{p\lambda}\right)^2 - 1\right)} - \arccos\left(\frac{p\lambda}{2ap}\right) \right], \quad (12)$$

де p – ціле число $0, 1 \dots n$.

Для лінійної еквідистантної антенної решітки (рис. 2) з урахуванням відстані між випромінювачами та їх кількості вираз (2) для розсіяного поля $\vec{E}^{\perp}_{p\pi r \text{ решітки}}$ набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} \vec{E}^{\perp}_{p\pi r \text{ решітки}} = & \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \left\{ \frac{b_p \sin\left(\frac{k_x b_p}{2}\right)}{\frac{k_x b_p}{2}} \cdot \left[\sum_{m_y=1}^{\infty} -2A_{+0m_y}^{\perp \Pi} \left(\frac{m_y \pi}{a_p}\right)^2 (1 + \rho_{0m_y}^H) \times \right. \right. \\ & \times \exp(-ink_y d_y) \frac{\sin^2\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a_p}{2}\right) - i \cos^2\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k_y a_p}{2}\right)}{\left(\frac{m_y \pi}{a_p}\right)^2 - k_y^2} - E_0 \times \\ & \left. \times \exp\left(\text{ind}_y(k \sin \theta_{\Pi} - k_y)\right) \frac{\sin\left(\frac{a_p}{2}(k_y - k \sin \theta_{\Pi})\right)}{\frac{a_p}{2}(k_y - k \sin \theta_{\Pi})} \right] \Bigg\} \times \\ & \times \exp\left(-i(k_x x + k_y y + k_z z)\right) dk_x dk_y, \end{aligned} \quad (13)$$

де m_y – кількість стоячих півхвиль, які вкладаються по стороні y , а $A_{+0m_y}^{\perp \Pi}$ вже було визначено в роботах [10, 11].

У (13) також використано коефіцієнт відбиття, який, на відміну від відомих, дозволяє розрахувати поле не тільки для n -го рупорного випромінювача, але й для всієї лінійної або прямокутної еквідистантної антенної решітки. Цей вираз відрізняється від (6) врахуванням відстані до першого випромінювача d_y (рис. 2) та до n -го nd_y . Відмінність також полягає у використанні для (13) додаткових множників: $\exp(-ink_y d_y)$ та $\exp\left(\text{ind}_y(k \sin \theta_{\Pi} - k_y)\right)$.

Із математичної моделі (3), до якої входить складова (6), добре видно, що коефіцієнти відбиття ρ_{-n}^H , наприклад хвилі H типу, у зворотному напрямку $-n$ від внутрішніх неоднорідностей залежатимуть від співвідношення розмірів рупора й довжини хвилі, яка падає на розкрив. У цьому разі можливі чотири варіанти, що наведено в табл. 1 [4].

Можливі варіанти співвідношення частоти хвилі, що падає, та її відбиття

| № з/п | Варіант співвідношення частоти хвилі, що падає на розкрит рупора | Можливий варіант її відбиття |
|-------|--|--|
| 1 | Хвиля, що падає, має частоту, нижчу критичної для розкрит рупора | Вона повністю відбивається від розкрит рупора |
| 2 | Хвиля, що падає, має частоту, нижчу критичної для живильного хвилеводу | Усі хвилі, збуджені в розкриті, відбиватимуться від позамежних для них перерізів рупора |
| 3 | Хвиля, що падає, має частоту, що входить у робочий діапазон антени | Збуджена в розкриті основна хвиля H_{01} проходить у живильний хвилевід. Її відбиття залежить від його навантаження і місця з'єднання з рупором. Вищі типи хвиль, збуджені в розкриті, не проходять у хвилевід, а відіб'ються від позамежних для них перерізів, як у другому випадку |
| 4 | Хвиля, що падає, має частоту, вищу за робочий діапазон рупорної антени | Деякі хвилі вищих типів, для яких хвилевід не є позамежним, разом із основною хвилею будуть проходити в нього, а коефіцієнт відбиття для них залежатиме від навантаження. Решта ж хвиль вищих типів, що не пройшли у хвилевід, відбиватимуться від позамежних для них перерізів у рупорі |

Отже, у випадках 2–4 необхідно врахувати відбиття від позамежних перерізів рупора, чого в попередніх дослідженнях не було зроблено.

У [6] отримано розрахункові формули для коефіцієнтів відбиття в разі, якщо відоме навантаження для хвиль основного типу прямокутного хвилеводу, за умови, що хвилі вищих типів не проникають у хвилевід, що живить антену.

Щоб отримати формули для четвертого випадку, необхідно знати коефіцієнти відбиття для хвиль вищих типів від неоднорідностей прямокутного хвилеводу.

2. *Визначення коефіцієнтів відбиття від внутрішніх неоднорідностей рупорного опромінювача.* Під час розв'язку задачі визначення розсіяного поля від розкрит рупорного випромінювача необхідне визначення коефіцієнтів відбиття від внутрішніх неоднорідностей у рупорі, зумовлених місцем з'єднання (стикування) рупора із хвилеводом, а також зміною перерізу вздовж розповсюдження хвилі та, як результат, виникненням відбитої хвилі від позамежних перерізів для хвиль, збуджених у розкриті рупора. При цьому будемо вважати відомим навантаження антени для хвилі основного типу.

Усі перераховані величини, коефіцієнт відбиття від місця з'єднання рупора із хвилеводом і коефіцієнт відбиття від позамежних перерізів всередині рупора можуть бути визначені методом поперечних перерізів, згідно з яким рупор розглядається як відрізок

хвилеводу, розміри поперечного перерізу якого плавно змінюється вздовж поздовжньої осі. Цей метод справедливий для рупорів із довільною формою розкриву, він розроблений у роботі [15]. Суть його полягає в тому, що в будь-якому перерізі нерегулярного хвилеводу поле можна подати у вигляді суперпозиції полів обох напрямів, що є в допоміжному прямокутному регулярному хвилеводі того ж перерізу і з тим самим розподіленням.

Застосовують метод у разі повільної зміни поперечного перерізу вздовж поздовжньої осі, тобто за малих кутів розкриву рупора [16]. Розглянемо правомірність його використання.

Як відомо, найбільш поширеними в антенній техніці є так звані оптимальні рупори, для яких фазова помилка в розкритті визначається для секторальних рупорів за такими виразами:

$$\psi_{mH} = \frac{\pi a_p^2}{4\lambda R_H} \leq \frac{3\pi}{4} \quad \text{для } H \text{ рупора,} \quad (14)$$

$$\psi_{mE} = \frac{\pi b_p^2}{4\lambda R_E} \leq \frac{\pi}{2} \quad \text{для } E \text{ рупора,} \quad (15)$$

де a_p, b_p – розміри розкриву рупора;

R_E, R_H – радіуси розкриву рупора в площинах E та H відповідно;

λ – довжина хвилі.

У випадку пірамідальних рупорів фазова помилка повинна бути менше допустимої для E та H окремо.

Використовуючи результати роботи [7], коефіцієнт відбиття від місця з'єднання (стикування) рупора із хвилеводом $\dot{\rho}_{ст}$ подамо в такому вигляді:

$$\dot{\rho}_{ст} \cong i \left[tg\theta_E \frac{1}{2K_{z01}b_x} - tg\theta_H \frac{\pi^2}{2K_{z01}^3 a_x^2} \right], \quad (16)$$

де a_x, b_x – розміри прямокутного хвилеводу, що живить рупор;

θ_E, θ_H – кути розкриву рупора в E та H площинах;

$K_{z01} = K \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_x}\right)^2}$ – постійна поширення хвилі основного типу H_{10} .

3. *Розрахунок коефіцієнта відбиття від позамежних перерізів.* Для розрахунку коефіцієнта відбиття від позамежних перерізів та хвильового числа $K_{zmn}(z)$ позначимо розміри рупорного опромінювача, як показано на рис. 3.

$K_{zmn}(z)$ – постійна поширення хвиль у хвилеводі порівняння, що є прямокутним хвилеводом такого ж перерізу, що й довільний переріз рупора.

Згідно з рис. 3 коефіцієнти відбиття від позамежних перерізів для хвиль магнітного типу (3), (4) матимуть такий вигляд:

$$\dot{\rho}_{пп}^H = \exp(i\delta_H(z)), \quad (17)$$

де

$$\delta_H(z) = -2 \int_{z_p}^{\tilde{z}} K_{zmn}(z) dz - \frac{\pi}{2} + \delta_{0H}. \quad (18)$$

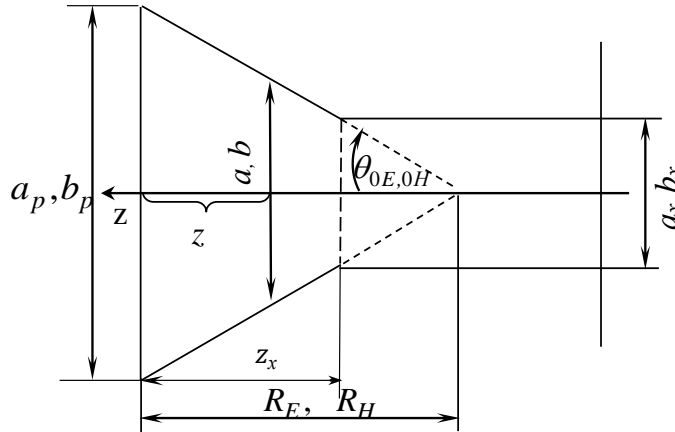


Рис. 3. Розміри рупорного опромінювача для розрахунку коефіцієнта відбиття та хвильового числа $K_{zmn}(z)$

Фізичний сенс першого доданка – це набіг фази хвилі під час проходження її від розкриття рупора з координатою $z = z_p$ до критичного перетину $z = \tilde{z}$ та назад, розрахований у наближенні геометричної оптики.

$\delta_{0H}(z)$ дає поправку до фази відбитої хвилі, пов'язаної з наявним хвилеводом.

Для хвиль електричного типу коефіцієнт відбиття від позамежного перетину $\rho_{\text{пп}}^E$ дорівнює

$$\rho_{\text{пп}}^E = \exp(i\delta_E(z)), \quad (19)$$

де

$$\delta_E(z) = -2 \int_{z_p}^{\tilde{z}} K_{zmn}(z) dz + \frac{\pi}{2} + \delta_{0E}. \quad (20)$$

Фізичний сенс виразу (20) такий самий, як і для (18).

Постійна поширення в рупорі (рис. 3) для хвиль типу H_{0n} набуде такого вигляду:

$$K_{z_n}^H(z) = K \sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{4(R_H - z) \text{tg} \theta_{0H}} \right)^2}, \quad (21)$$

де R_H – відстань від кромки рупора до його центра в площині H (рис. 3);

θ_{0H} – кут розкриття від кромки рупора до його центра в площині H (рис. 3).

Підставимо у вираз (17) значення $K_{z_n}^H(z)$ із (21). Розташувавши початок координат у центрі розкриття $|z_p = 0|$, врахуємо координату позамежного перерізу \tilde{z} у такому вигляді [6]:

$$\tilde{z} = R_H - \frac{n\lambda}{4} \text{ctg} \theta_{0H}. \quad (22)$$

Тоді після взяття інтегралу отримаємо

$$\varphi_{\rho_{\text{ПП}}}^H = \frac{-n\pi}{\text{tg}\theta_{0H}} \left(\sqrt{\left(\frac{4R_H \text{tg}\theta_{0H}}{n\lambda}\right)^2 - 1} - \arccos \frac{n\lambda}{4R_H \text{tg}\theta_{0H}} \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (23)$$

Коефіцієнти відбиття хвиль основного типу від місця стикування хвилеводу з рупором за формулою (16) на розкритті дорівнюватимуть

$$\rho_{\text{ст}}(0) = i \left(\frac{\text{tg}\theta_{0H} \pi^2}{2a_x^3 K_{z01}^3(z_x)} - \frac{\text{tg}\theta_{0H}}{2b_x K_{z01}} \right) \times \\ \times \exp \left\{ i\pi \text{ctg}\theta_{0H} \left(\sqrt{\left(\frac{2a_x}{\lambda}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{2a_p}{\lambda}\right)^2 - 1} - \arccos \left(\frac{\lambda}{2a_x}\right) + \arccos \left(\frac{\lambda}{2a_p}\right) \right) \right\}, \quad (24)$$

де a_x, a_p – розміри хвилеводу й розкриття рупора в площині H відповідно;

z_x – відстань від розкриття до місця стикування хвилеводу з рупором;

θ_{0H} – кут розкриття рупора в площині H .

Отже, усі величини математичної моделі для розрахунку розсіяного поля (9)–(12) знайдено. Коефіцієнт відбиття хвилі основного типу H_{01} на розкритті в разі довільного навантаження буде дорівнювати

$$\rho_{-01}(0) = \left(\rho_{\text{ст}}(z_x) + \rho_{01}(z_x) \frac{(1 - \rho_{\text{ст}})^2}{1 - \rho_{01}\rho_{\text{ст}}} \right) \times \\ \times \exp \left\{ i\pi \text{ctg}\theta_{0H} \left(\sqrt{\left(\frac{2a_x}{\lambda}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{2a_p}{\lambda}\right)^2 - 1} - \arccos \left(\frac{\lambda}{2a_x}\right) + \arccos \left(\frac{\lambda}{2a_p}\right) \right) \right\}, \quad (25)$$

де $\rho_{\text{ст}}$ знаходимо з виразу (24);

ρ_{01} – коефіцієнт відбиття від навантаження в місці стикування хвилеводу з рупором (він вважається заданим).

Отримані вирази дозволяють розрахувати ЕПР і для відкритого кінця хвилеводу, при цьому поза межних перетинів не буде.

Аналогічно двом наведеним прикладам знаходження ЕПР рупора лінійної поляризації можна розрахувати ЕПР рупорного опромінювача колової поляризації. Різними будуть лише коефіцієнти відбиття від внутрішніх неоднорідностей.

Для перевірки виведених математичних виразів для розрахунку ЕПР рупора в складі ФАР необхідно дослідити внесок відбитого сигналу від апертури антени в її сумарну (інтегральну) ЕПР. Із цією метою було проведено натурний експеримент. Вимірювання ЕПР антени проводилися за умов підключення до узгодженого навантаження, за закороченого виходу й розімкненого фідера.

Результати експерименту для рупора, що має розміри $(4,6a \times 3b)\lambda$ (м²), наведено в табл. 2.

Дослідження проводилося для частот $f = 10\text{--}15$ ГГц за нормальної поляризації електромагнітної хвилі, що падає на рупор, до площини її падіння.

Таблиця 2

Виміряні значення інтегральної ЕПР

| Розміри рупора ($4,6a \times 3b$) λ (м ²) | Виміряні значення ЕПР (м ²) | | |
|--|---|--------------------------------|---------------------------|
| | за розімкненого фідера | за узгодженого навантаження | за закороченого виходу |
| $\lambda = 0,02$ | 0,289 | 0,304 | 0,315 |
| $\lambda = 0,03$ | 0,403 | 0,423 | 0,436 |

Відносно невеликі зміни ЕПР антени (табл. 2) за розімкненого фідера й узгодженого навантаження свідчать про значний внесок відбитого сигналу від апертури антени в її сумарну (інтегральну) ЕПР, що підтверджується дослідженнями інших вчених [18–24], а саме проведених із використанням пакетів сучасних програм Ref_ZZ та FEKO.

Із виразів (14), (15) можна зробити висновок, що для оптимальних рупорних опромінювачів метод поперечних перерізів можна застосовувати, якщо розміри їх розкриву більше 2λ . При цьому для вибору кута розкриву слід враховувати відбиття від місця з'єднання рупора із хвилеводом, яке призводить до того, що радіус розкриву береться більшим, ніж оптимальний.

Залежності кутів розкриву рупора від розмірів розкриву, розраховані за формулами (14)–(15), наведено в табл. 3–4.

Таблиця 3

Співвідношення розмірів розкриву і кутів розкриву для оптимальних H рупорів

| a_p/λ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|------|------|-------|-------|------|
| θ_H^0 | 56,3 | 36,8 | 25,56 | 20,55 | 16,7 |

Таблиця 4

Співвідношення розмірів розкриву і кутів розкриву для оптимальних E рупорів

| b_p/λ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|----|-------|-------|-------|------|
| θ_E^0 | 45 | 26,56 | 18,43 | 14,05 | 11,3 |

З отриманих результатів видно, що метод поперечних перерізів можна застосовувати для розрахунку опромінювачів, використовуючи вказані умови.

Обмежень застосування теорії малих кутів розкриву можна уникнути, якщо користуватися запропонованими співвідношеннями розмірів і кутів розкриву для оптимальних E та H рупорів, що продемонстровано на рис. 4.

Як бачимо, для заданих розмірів розкриву $a_p \times b_p = (4,59 \times 3,0)\lambda$ оптимальний кут розкриву рупора повинен становити $\theta_H = 19^\circ$.

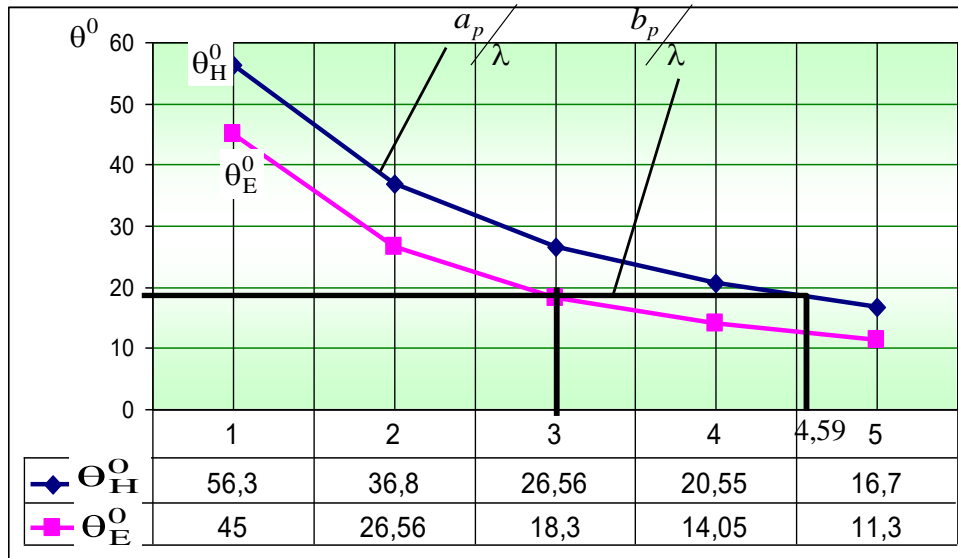


Рис. 4. Співвідношення розмірів і кутів розкриття для оптимальних E та H рупорів

Було поставлено натурний експеримент щодо вимірювання ЕПР для кутів $\theta_H = 18^\circ$, $\theta_H = 19^\circ$, $\theta_H = 20^\circ$. Результати вимірювань наведено на рис. 5.

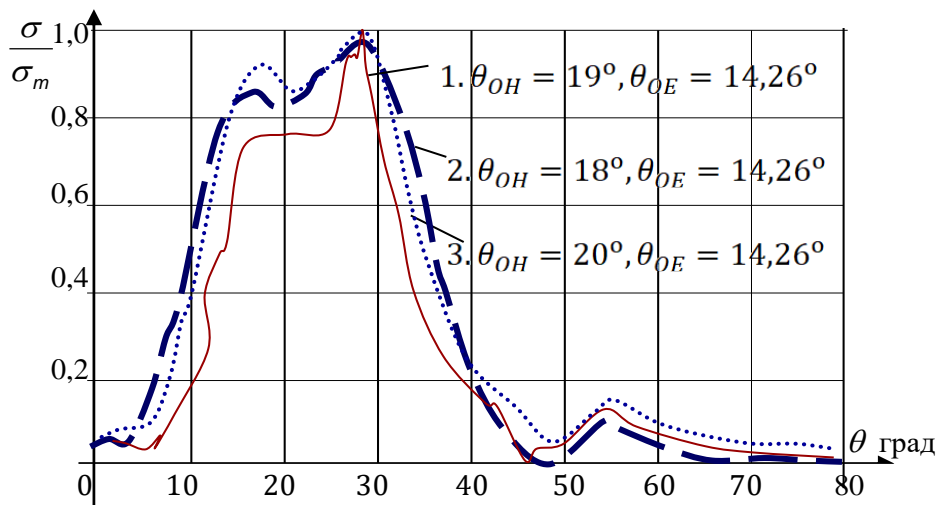


Рис. 5. Діаграма ЕПР рупорних опромінювачів розміром $a_p \times b_p = (4,59 \times 3,0)\lambda$ за різних кутів розкриття в площині H

Із діаграм (рис. 5) випливає, що в разі незначного відхилення від оптимального кута $\theta_H = 19^\circ$ ЕПР зростає, тобто за кутів $\theta_H = 18^\circ$ та $\theta_H = 20^\circ$ – вона збільшується.

Висновки. У статті наведено розрахункові формули дослідження поля, відбитого розкритвом одного або n -го випромінювача антенної решітки, у разі падіння на неї нормально поляризованої хвилі, асимптотичними методами із застосуванням леми Лоренца.

Визначено коефіцієнти відбиття для хвиль електричного й магнітного типу від розкритву за умови узгодження з хвильовим опором вільного простору.

Виведено формулу для розсіяного поля від розкриву без урахування внеску паразитних хвиль для випадку $\theta = \theta_{\Pi}$, $\varphi = \varphi_{\Pi} = \frac{3\pi}{2}$ та з його урахуванням.

Із отриманих математичних моделей добре видно, що коефіцієнти відбиття ρ_{-n}^H , наприклад хвилі H типу, у зворотному напрямку ($-n$) від внутрішніх неоднорідностей залежатимуть від співвідношення розмірів рупора й довжини падаючої на розкрив хвилі.

Із розглянутих виразів (14)–(15) можна зробити висновок, що для оптимальних рупорних опромінювачів метод поперечних перерізів можна застосовувати, якщо розміри їх розкриву більше 2λ . При цьому під час вибору кута розкриву слід враховувати відбиття від місця з'єднання рупора із хвилеводом, яке призводить до того, що радіус розкриву береться більшим, ніж оптимальний, тобто за малих розмірів розкриву рупора кути розкриву повинні бути також малими. Отже, отримано формули саме для випадку нормальної поляризації падаючої електромагнітної хвилі до площини її падіння (рис. 1–2), а також враховано коефіцієнти відбиття для хвиль вищих типів від неоднорідностей прямокутного хвилеводу та поперечних його перерізів. Крім того, вдалося покращити математичну модель дослідження перевипроміненої від ФАР електромагнітної енергії з визначенням усіх коефіцієнтів відбиття від рупорних опромінювачів та врахуванням коефіцієнтів відбиття від їх поза межних перерізів для випадку нормальної поляризації падаючої електромагнітної хвилі до площини її падіння.

Урахування усіх коефіцієнтів відбиття під час проектування дозволить зменшити коефіцієнт стоячої хвилі за напругою та рівень бічних пелюсток. Це сприятиме покращенню розвідзахищеності зразків ОБТ, до складу яких входить рупор як окрема антена або в складі ФАР.

Випадок збігу поляризації електромагнітної хвилі, що падає на антену, із площиною її падіння в статті не було розглянуто, тому метою подальших досліджень є вдосконалення математичного апарату розрахунку електромагнітного поля, перевипроміненого ФАР, для цих умов. Саме суперпозиція обох варіантів і дозволить отримати розв'язок для довільного падіння такої хвилі.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Сидорчук О. Л., Залевський В. Й., Ковальчук В. В. Математична модель дослідження коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів фазованих антенних решіток // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 25 (I). С. 76–89. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.07>
2. Bahr R., Fang Y., Su W. et al. Novel Uniquely 3D Printed Intricate Voronoi and Fractal 3D Antennas // In Proceedings of the 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2017. P. 1583–1586. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058934>
3. Розв'язування рівняння методом сідлової точки для електромагнітного поля, розсіяного рупорним випромінювачем / О. Л. Сидорчук, С. О. Соколенко, В. В. Ковальчук, Л. М. Маришук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2023. № 91. С. 28–36. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.28-36>

4. Singh M., Singh S. Design and Performance Investigation of Miniaturized Multi-Wideband Patch Antenna for Multiple Terahertz Applications // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. February 2021. № 44 (12):100900. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2021.100900>
5. Saeed N. H., Farhan M. J., Al-Sherbaz A. Design and Analysis of Microstrip Antenna for 5G Applications // *Journal Eng. Sustain. Dev.* 2024. Vol. 28. P. 163–174. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.2.10.2024>
6. Suliman Munawar H. Applications of Leaky-Wave Antennas: A Review // *Int. J. Wirel. Microwave Technol.* 2020. Vol. 10. P. 56–62. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2020.03.05>
7. Xu F., Wu K., Zhang X. Periodic Leaky-Wave Antenna for Millimeter Wave Applications Based on Substrate Integrated Waveguide // *IEEE T. Antenn. Propag.* 2010. Vol. 58. P. 340–347. <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2026593>
8. Yang S. T., Ling H. RCS of a Microstrip Leakywave Antenna // *IEEE Antennas Wirel. Pr.* 2013. Vol. 12. P. 35–38. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2236677>
9. An Seamless Stitching Method for Large Field Equivalent Center Projection Image Based on Rotating Camera / Chunmei Li, Jiuyun Sun, Xinnai Zhang, Lianpeng Zhang // *Scientific Reports*. November 2024. Vol. 14 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80295-4>
10. Multiple Beam Ptychography for Large Eld-of-View, High Throughput, Quantitative Phase Contrast Imaging / C. Bevis et al. // *Ultramicroscopy*. 2018. Vol. 184. P. 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.08.018>
11. Ree-Dimensional (3D) Reconstructions of the Coastal Cli Face in Normandy (France) Based on Oblique Pleiades Imagery: Assessment of Ames Stereo Pipeline and MicMac Processing Chains / P. Letortu et al. // *Int. Journal Remote Sens.* 2021. Vol. 42. P. 4562–4582. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1892857>
12. Qin R. J. A Critical Analysis of Satellite Stereo Pairs for Digital Surface Model Generation and a Matching Quality Prediction Model // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. Vol. 154. P. 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.005>
13. Bulashenko A. V., Piltyay S. I. Equivalent Microwave Circuit Technique for Waveguide Iris Polarizers Development // *Visnyk NTUU KPI. Serii – Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannia*. 2020. Iss. 83. P. 17–28. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.17-28>
14. Сидорчук О. Л. Аналіз методів і способів зменшення ефективною поверхні розсіювання антенних систем // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир*, 2012. № 2 (61). С. 94–106.
15. Сидорчук О. Л., Залевський В. Й. Дослідження дифракції електромагнітної хвилі на кромках пірамідальної рупорної антени як однієї з причин розсіювання // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2022. № 89. С. 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.11-20>
16. Сидорчук О. Л. Проблематика методів оцінювання антен зі зменшеною ефективною поверхнею розсіювання засобів радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2022. Вип. 22. С. 14–29.* <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22.02.10>
17. Сидорчук О. Л. Метод покращення поляризаційних характеристик антенних систем переносних станцій наземної розвідки // *Проблеми створення, випробування, застосування*

та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2018. Вип. 15. С. 78–93.

18. Сидорчук О. Л. Метод проектування радіолокаційних станцій наземної розвідки з антенною системою колової поляризації // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони. Київ : НУОУ, 2018. Вип. 3 (33) С. 25–35.

19. Reconstructing Stem Cross Section Shapes From Terrestrial Laser Scanning / Wang D., Kankare V., Puttonen E. et al. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. № 14 (2). P. 272–276. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2638738>

20. Stem Biomass Estimation Based on Stem Reconstruction from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds / Yu X., Liang X., Hyypä J. et al. // Remote Sensing Letters. 2013 Vol. 4 (4). P. 344–353. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2012.734931>

21. Medvedik M. Y., Smirnov Y. G., Tsupak A. A. Inverse Vector Problem of Diffraction by Inhomogeneous Body with A Piecewise Smooth Permittivity // Journal of Inverse III-Posed Problems. 2023. Vol. 32, Iss. 3, P. 453–465. <https://doi.org/10.1515/jiip-2022-0060>

22. Smirnov Y. G., Tsupak A. A. Direct and Inverse Scalar Scattering Problems for the Helmholtz Equation in R^m // Journal of Inverse III-Posed Problems. 2022. Vol. 30, Iss. 1. P. 101–116. <https://doi.org/10.1515/jiip-2020-0060>

23. Methodology Improvement of the Electromagnetic Field Amplitude Study Related to the Antenna System Risk Radio-Solid Station of Land-Development "Credo-M1" / O. Sidorchuk, O. Tofanchuk, O. Krytenko, Yu. Kalenchuk // Scientific Works of Kharkiv National Air Force University. 2017. № 5 (54). С. 102–109.

24. Сидорчук О. Л. Дослідження амплітуд електромагнітного поля, збудженого лінійною решіткою рупорних опромінювачів // Вісник Нац. техніч. ун-у України «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Київ, 2016. № 67 С. 05–11. <https://doi.org/10.20535/radap.2016.67.5-11>

Стаття надійшла до редакції 17.03.2026.

Прийнято до друку 12.04.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Sydorchuk, O. L., Zalevskiy, V. Y., & Kovalchuk, V. V. (2024). Matematychna model doslidzhennia koefitsientiv vidbyttia vid rupornykh vyprominiuvachiv fazovanykh antenykh reshitok [Simulation of Reflection from Horn Emitters of Phased Antenna Arrays to Determine the Coefficients]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 25 (I), 76–89. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.07> Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].
2. Bahr, R., Fang, Y., Su, W., et al. (2017). Novel Uniquely 3D Printed Intricate Voronoi and Fractal 3D Antennas . In *Proceedings of the 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, (pp. 1583–1586). <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058934>

3. Sydoruk, O. L., Sobolenko, S. O., Kovalchuk, V. V., & Maryshchuk, L. M. (2023). Rozv'iazuvannia rivniannia metodom sidlovoi tochky dlia elektromahnitnoho polia, rozsiianoho rupornym vprominiuvachem [Solving the Equation Using the Saddle Point Method for the Electromagnetic Field Scattered by a Horn Emitter]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii – Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". The series – Radio Equipment. Radio Equipment Manufacturing]*, 91, 28–36. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.28-36> [in Ukrainian].
4. Singh, M., & Singh, S. (2021). Design and Performance Investigation of Miniaturized Multi-Wideband Patch Antenna for Multiple Terahertz Applications. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 44 (12):100900. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2021.100900>
5. Saeed, N. H., Farhan, M. J., & Al-Sherbaz, A. (2024). Design and Analysis of Microstrip Antenna for 5G Applications. *Journal Eng. Sustain. Dev.*, 28, 163–174. <https://doi.org/10.31272/jeasd.28.2.10.2024>
6. Suliman Munawar, H. (2020). Applications of Leaky-Wave Antennas: A Review. *Int. Journal Wirel. Microwave Technol.*, 10, 56–62. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2020.03.05>
7. Xu, F., Wu, K., & Zhang, X. (2010). Periodic Leaky-Wave Antenna for Millimeter Wave Applications Based on Substrate Integrated Waveguide. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 58, 340–347. <https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2026593>
8. Yang, S. T., & Ling, H. (2013). RCS of a Microstrip Leakywave Antenna. *IEEE Antennas Wirel. Pr.*, 12, 35–38. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2236677>
9. Chunmei Li, Jiuyun Sun, Xinnai Zhang, Lianpeng Zhang. (2024). An Seamless Stitching Method for Large Field Equivalent Center Projection Image Based on Rotating Camera. *Scientific Reports*, 14 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80295-4>
10. Bevis, C. et al. (2018). Multiple Beam Ptychography for Large Eld-of-View, High Throughput, Quantitative Phase Contrast Imaging. *Ultramicroscopy*, 184, 64–171. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.08.018>
11. Letortu, P. et al. (2021). Ree-Dimensional (3D) Reconstructions of the Coastal Cli Face in Normandy (France) Based on Oblique Pleiades Imagery: Assessment of Ames Stereo Pipeline and MicMac Processing Chains. *Int. J. Remote Sens.*, 42, 4562–4582. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1892857>
12. Qin ,R. J. (2019). A Critical Analysis of Satellite Stereo Pairs for Digital Surface Model Generation and a Matching Quality Prediction Model. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 154, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.005>
13. Bulashenko, A. V., & Piltyay, S. I. (2020). Equivalent Microwave Circuit Technique for Waveguide Iris Polarizers Development. *Visnyk NTUU KPI. Serii – Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". The series – Radio Equipment. Radio Equipment Manufacturing]*, 83, 17–28. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.17-28>
14. Sydoruk, O. L. (2012). Analiz metodiv i sposobiv zmeshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia antenykh system [Analysis of Methods and Ways of Reducing the Effective Scattering Surface of Antenna Systems]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin ZhSTU. Technical Sciences]*, 2 (61), 94–106. Zhytomyr [in Ukrainian].

15. Sydoruk, O. L., & Zalevskiy, V. Y. (2022). Doslidzhennia dyfraktsii elektromahnitnoi khvyli na kromkakh piramidalnoi rupornoï anteny yak odniiei z prychn rozsiuvannia [Investigation of Electromagnetic Wave Diffraction at the Edges of a Pyramidal Horn Antenna as One of the Causes of Scattering]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii – Radiotekhnika. Radioaparaturubuduvannia [Bulletin of NTUU "KPI". The series – Radio Equipment. Radio Equipment Manufacturing]*, 89, 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.11-20>
16. Sydoruk, O. L. (2022). Problematyka metodiv otsiniuvannia anten zi zmenshenoiu efektyvnoiu poverkhneiu rozsiuvannia zasobiv radioelektronnoi rozvidky ta radioelektronnoi borotby [Challenges of Evaluation Methods for Antennas with Reduced Effective Scattering Surfaces in Signals Intelligence and Electronic Warfare Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 22, 14–29. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22.02> [in Ukrainian].
17. Sydoruk, O. L. (2018). Metod pokrashchennia poliaryzatsiinykh kharakterystyk antenykh system perenosnykh stantsii nazemnoi rozvidky [A Method for Improving the Polarization Characteristics of Antenna Systems for Portable Ground Reconnaissance Stations]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 15, 78–93. Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].
18. Sydoruk, O. L. (2018). Metod proiektuvannia radiolokatsiinykh stantsii nazemnoi rozvidky z antennoiu systemoiu kolovoi poliaryzatsii [Method of Designing Ground Reconnaissance Radar Stations with a Circular Polarization Antenna System]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky i oborony [Modern Information Technologies in the Field of Security and Defense]*, 3 (33), 25–35. Kyiv [in Ukrainian].
19. Wang, D., Kankare, V., & Puttonen, E. et al. (2017). Reconstructing Stem Cross Section Shapes from Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14 (2), 272–276. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2638738>
20. Yu, X., Liang, X., & Hyyppä, J. et al. (2013). Stem Biomass Estimation Based on Stem Reconstruction from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds. *Remote Sensing Letters*, 4 (4), 344–353. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2012.734931>
21. Medvedik, M. Y., Smirnov, Y. G., & Tsupak, A. A. (2023). Inverse Vector Problem of Diffraction by Inhomogeneous Body with A Piecewise Smooth Permittivity. *Journal of Inverse III-Posed Problems*, 32, 3, 453–465. <https://doi.org/10.1515/jiip-2022-0060>
22. Smirnov, Y. G., & Tsupak, A. A. (2022). Direct and Inverse Scalar Scattering Problems for the Helmholtz Equation in R^m . *Journal of Inverse III-Posed Problems*, 30, 1, 101–116. <https://doi.org/10.1515/jiip-2020-0060>
23. Sidoruk, O., Tofanchuk, O., Krytenko, O., & Kalenchuk, Yu. (2017). Methodology Improvement of the Electromagnetic Field Amplitude Study Related to the Antenna System Risk Radio-Solid Station of Land-Development "Credo-M1". *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, 5 (54), 102–109.

24. Sydoruk, O. L. (2016). Doslidzhennia amplitud polia, zbudzhenoho liniinoiu reshitkoiu rupornykh oprominiuvachiv [The Study of the Amplitudes of the Fields Excited Linear Grating Horn Irradiators]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriiia «Radiotekhnika. Radioaparaturubuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio equipment. Radio Equipment Manufacturing"]*, 67, 5–11. <https://doi.org/10.20535/radap.2016.67.5-11> [in Ukrainian].

O. L. Sydoruk, V. Y. Zalevskiy, V. H. Tsyporenko

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC WAVE REFLECTION COEFFICIENTS FROM EXTERNAL CROSS-SECTIONS OF HORN RADIATORS OF PHASED ANTENNA ARRAYS

The article is devoted to the problem of studying the reflection coefficients from horn irradiators, which are part of phased antenna arrays in order to reduce their radar visibility.

The study of the electromagnetic energy reradiated from the irradiators of phased antenna arrays was carried out with the determination of all reflection coefficients from horn irradiators and taking into account the reflection coefficients from their extra-boundary sections.

It was found that the advantage of using horn antennas is their high directivity, significant efficiency and fairly high gain. However, their main disadvantage is the back-radiation (scattering) of electromagnetic waves by the antenna design elements. This affects the radar visibility of weapons and military equipment and their electromagnetic compatibility.

To eliminate these shortcomings, the article analyzes the characteristics of the backscattering diagrams of horn radiators included in phased array antennas, taking into account the reflection coefficients from their extra-boundary sections. The authors propose an improved mathematical apparatus for calculating the electromagnetic field reradiated by an antenna array consisting of pyramidal horn radiators for the case of normal polarization of the electromagnetic wave to the plane of its incidence.

The novelty is the consideration of reflection coefficients from the extra-boundary cross-sections of horn irradiators, which are part of phased antenna arrays.

During the study, the causes and patterns of such a phenomenon as the reflection of electromagnetic waves from the internal inhomogeneities of horn antennas, the places of docking of the waveguide with the horn, and the consideration of reflection coefficients from their extra-boundary cross-sections, in order to reduce it, were clarified.

This will reduce the standing wave voltage coefficient and the level of side lobes. Consequently, the sounding radar station will receive a reduced level of the reflected signal, which will improve the reconnaissance protection of weapons models that include a horn as a separate antenna or as part of equidistant linear phased antenna arrays.

Keywords: *pyramidal horn radiator; reflection coefficient; phased array antenna; extra-boundary cross section; effective scattering surface (area).*

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.10

УДК 351.86:355.4

В. А. Каптур, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Окремий спеціальний центр електронної підтримки Командування Сухопутних військ

Збройних Сил України

<https://orcid.org/0000-0003-4200-1151>

Є. П. Подкалюк

Інститут прикладних систем управління Національної академії наук України

<https://orcid.org/0009-0009-4236-2986>

ФОРМУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ТИПОВОЇ КОНЦЕПЦІЇ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ВІЙНИ

У статті розглянуто проблематику забезпечення захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз. Наведено основні фактори, що впливають на рівень безпеки таких об'єктів в умовах використання засобів повітряного нападу (наприклад, безпілотних літальних апаратів), диверсійних дій та інших деструктивних впливів. Також проаналізовано підходи до оцінювання рівня захищеності та формування систем безпеки для цих об'єктів.

Розглянуто вплив сучасних воєнних загроз на функціонування стратегічно важливих елементів інфраструктури держави, зокрема енергетичних підприємств, об'єктів видобувної галузі, транспортних вузлів і систем зв'язку. Проаналізовано роль безпілотних літальних апаратів, використання яких суттєво підвищує ризики порушення функціонування об'єктів критичної інфраструктури, як одного з ключових засобів ведення сучасних бойових дій.

На основі результатів проведеного аналізу обґрунтовано необхідність формування типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури, яка може використовуватися як методична основа для створення комплексних систем безпеки таких об'єктів в умовах сучасної війни. У роботі запропоновано структуру концепції, що включає: аналіз загроз, прикладів атак та наявних систем захисту; оцінювання об'єкта критичної інфраструктури, зокрема його інженерних особливостей; формування підсистем моніторингу повітряної обстановки, впливу на безпілотні літальні апарати та пасивного захисту; вибір обладнання та встановлення обсягів захисту; визначення пріоритетів; організаційні заходи безпеки та оцінювання ефективності функціонування системи захисту.

Метою роботи є формування та обґрунтування структури типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз.

Отримані результати можуть бути використані під час розроблення програм захисту вразливих об'єктів та формування практичних рекомендацій щодо підвищення їх стійкості до сучасних загроз.

© В. А. Каптур, Є. П. Подкалюк, 2026

Ключові слова: критична інфраструктура; захист об'єктів; воєнні загрози; безпілотний літальний апарат; система безпеки; концепція захисту.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні воєнні конфлікти передбачають активне застосування високотехнологічних засобів ураження, наприклад, безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також крилатих та балістичних ракет. Однією з ключових цілей атак із застосуванням таких засобів дедалі частіше стають об'єкти критичної інфраструктури, до яких належать енергетичні об'єкти, підприємства видобувної галузі, транспортні вузли, системи зв'язку та інші стратегічно важливі елементи функціонування економіки й обороноздатності країни [3, 4].

Досвід ведення бойових дій в Україні демонструє, що вразливість об'єктів критичної інфраструктури до комплексних атак із повітря та інших видів впливу може призводити до значних економічних втрат, порушення стабільності функціонування систем управління та створення загроз для національної безпеки. Особливої актуальності набуває питання забезпечення належного рівня захисту таких об'єктів від новітніх загроз, зокрема масованого застосування БПЛА та високоточної зброї [1, 5].

Аналіз сучасних досліджень показує, що питання підвищення рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури порушені в [5, 6], де запропоновано науково-методичні підходи до оцінювання рівня безпеки таких об'єктів на основі використання комплексу технічних засобів захисту від БПЛА та ракетного озброєння. У публікації [7] розглянуто особливості застосування методів оцінювання спроможностей систем захисту об'єктів в умовах повітряних загроз. У свою чергу, у роботах [2, 8] проаналізовано питання використання сучасних технологій, зокрема безпілотних систем, для забезпечення охорони та моніторингу об'єктів.

Водночас результати проведених досліджень свідчать про відсутність єдиного узагальненого підходу до формування типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз. Це зумовлює необхідність розроблення вимог до структури та змісту такої концепції, яка б враховувала сучасні ризики, технологічні можливості засобів захисту, а також організаційні та економічні аспекти забезпечення безпеки стратегічно важливих об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз є предметом дослідження багатьох науковців і фахівців у галузі національної безпеки, оборонних технологій та систем захисту. Значна увага приділяється аналізу можливих загроз для таких об'єктів, оцінюванню їх вразливостей та розробленню ефективних підходів до формування систем захисту.

У роботі [1] проаналізовано сучасний стан розвитку питання захисту об'єктів із застосуванням інженерних боєприпасів, що дозволяє визначити основні напрями вдосконалення наявних підходів до забезпечення безпеки стратегічно важливих об'єктів. При цьому акцент зроблено на питаннях організації інженерного захисту та підвищення стійкості об'єктів до різних видів ураження.

У [3] розглянуто особливості застосування різних засобів захисту критичної інфраструктури під час збройної агресії з боку РФ. Автор проаналізував практичний досвід функціонування систем захисту в умовах воєнного стану та визначив основні проблеми, що виникають у ході забезпечення безпеки стратегічно важливих об'єктів.

Важливим напрямом досліджень є розроблення методів оцінювання ефективності систем захисту критичних об'єктів в умовах протидії засобам повітряного нападу. Зокрема, у публікації [4] запропоновано системний підхід до цього питання, який передбачає комплексне врахування різних факторів, що впливають на рівень захищеності об'єктів.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені оцінюванню рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури на основі використання комплексних систем захисту. Так, у [5, 6] запропоновано науково-методичні підходи до визначення рівня безпеки таких об'єктів із застосуванням інтегрованих систем захисту від БпЛА, крилатих та балістичних ракет. Вони передбачають використання комплексу технічних засобів, що забезпечують виявлення, ідентифікацію та нейтралізацію повітряних загроз.

У статті [7] розглянуто можливості використання методу оцінювання спроможностей для вирішення завдань захисту вразливих об'єктів від повітряного нападу, який дозволяє оцінювати ефективність систем захисту з урахуванням їх функціональних можливостей та наявних ресурсів.

Крім того, у сучасних дослідженнях висвітлено питання використання новітніх технологій для забезпечення охорони та моніторингу таких об'єктів. Зокрема, у роботах [2, 8] проаналізовано можливості застосування безпілотних технологій та методів оцінювання вразливості таких об'єктів в умовах воєнного стану.

Питання захисту об'єктів критичної інфраструктури також активно розглядають у міжнародній практиці. Зокрема, у країнах Європейського Союзу реалізується Європейська програма захисту (European Programme for Critical Infrastructure Protection – EPCIP), яка передбачає ідентифікацію об'єктів, оцінювання ризиків їх функціонування, а також розроблення та впровадження заходів підвищення їх стійкості до різних типів загроз [9].

У країнах НАТО питання захисту критичної інфраструктури досліджуються як складова забезпечення національної та колективної безпеки. Відповідні підходи передбачають проведення комплексного аналізу загроз, оцінювання вразливостей об'єктів, підвищення рівня їх стійкості та організацію взаємодії між державними органами, військовими структурами й операторами критичної інфраструктури [10].

Крім того, у Сполучених Штатах Америки широко застосовують модель обміну інформацією про загрози для вразливих об'єктів на основі діяльності спеціалізованих центрів обміну та аналізу інформації (Information Sharing and Analysis Centers – ISAC). Основною метою таких центрів є забезпечення оперативного обміну інформацією про потенційні загрози, вразливості та інциденти між державними структурами й операторами інфраструктури [11].

Формулювання завдання дослідження. Аналіз наукових публікацій свідчить, що, попри значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам забезпечення безпеки

критичної інфраструктури, питання формування узагальненої типової концепції захисту таких об'єктів у сучасних умовах залишається недостатньо опрацьованим. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі, зокрема щодо визначення основних вимог до структури та змісту такої концепції.

Метою статті є формування основних вимог до типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз. Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити аналіз сучасних підходів до забезпечення безпеки таких об'єктів, розглянути основні загрози їх функціонуванню в умовах війни, а також запропонувати структуру типової концепції їх захисту з урахуванням сучасних технічних, організаційних та економічних аспектів забезпечення безпеки.

Виклад основного матеріалу

Сучасні загрози для об'єктів критичної інфраструктури в умовах війни

У сучасних умовах ведення бойових дій об'єкти критичної інфраструктури стають одними з основних цілей для противника, оскільки їх ураження може суттєво вплинути на функціонування економіки, енергетичної системи, транспортних мереж та систем управління. До них належать підприємства енергетичного сектора, об'єкти видобувної галузі, транспортні вузли, системи зв'язку, а також інші елементи інфраструктури, що забезпечують життєдіяльність держави та її обороноздатність [3, 8].

Досвід сучасної війни в Україні свідчить, що засоби повітряного нападу, зокрема крилаті та балістичні ракети, а також БпЛА різних типів стали основними для ураження об'єктів критичної інфраструктури. Масоване застосування таких засобів дозволяє противнику здійснювати атаки на значній відстані та створювати неабиякі ризики для функціонування стратегічно важливих об'єктів [5, 6].

Особливу небезпеку становить широке використання БпЛА, які можуть застосовуватися як для проведення розвідки, так і для безпосереднього ураження об'єктів інфраструктури. Завдяки відносно низькій вартості, можливості масового застосування та складності своєчасного виявлення безпілотні системи стають одним із найбільш поширених інструментів ведення сучасної війни [2, 5].

Крім засобів повітряного нападу, вразливі об'єкти інфраструктури можуть зазнавати впливу інших видів загроз, зокрема диверсійних дій, кібератак, а також порушення функціонування систем управління та зв'язку. Комплексний характер цих загроз значно ускладнює забезпечення належного рівня захисту стратегічно важливих об'єктів [1, 4].

У зв'язку з цим виникає необхідність формування комплексних систем захисту об'єктів критичної інфраструктури, які повинні включати як технічні засоби протидії сучасним загрозам, так і організаційні заходи, спрямовані на підвищення стійкості функціонування таких об'єктів в умовах воєнного часу. При цьому важливим завданням є розроблення узагальненого підходу до організації захисту, що дозволить систематизувати наявні рішення та забезпечити їх ефективне застосування для різних типів об'єктів.

Необхідність формування типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури

Забезпечення належного рівня захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз є складним багатокomпонентним завданням, що потребує

системного підходу до організації заходів безпеки. Аналіз наукових досліджень показує, що відомі підходи до забезпечення безпеки об'єктів здебільшого спрямовані на вирішення таких окремих завдань: оцінювання вразливості об'єктів, визначення ефективності технічних засобів захисту, аналіз окремих типів загроз [4–7].

Водночас практичний досвід функціонування підприємств критичної інфраструктури свідчить, що заходи безпеки часто формуються з урахуванням специфіки окремих галузей, що призводить до різноманітності підходів до організації систем захисту та ускладнює їх комплексне застосування [3, 8].

У сучасних умовах збройного протистояння значна частина загроз має комплексний характер, поєднуючи застосування засобів повітряного нападу, безпілотних систем, диверсійних дій та кібернетичних атак. Це зумовлює необхідність створення багаторівневих систем захисту, що включатимуть технічні, організаційні та управлінські заходи забезпечення безпеки вразливих об'єктів [5–7].

Отже, актуальним завданням є формування типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури, яка могла б стати методичною основою для розроблення систем безпеки різних об'єктів з урахуванням їх функціонального призначення та особливостей експлуатації. Вона повинна визначати основні принципи організації захисту, структуру системи безпеки та перелік ключових заходів, спрямованих на запобігання, виявлення та нейтралізацію загроз.

Пропозиції щодо структури типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури

З урахуванням характеру сучасних воєнних загроз, результатів наукових досліджень у сфері захисту критичної інфраструктури, а також практичного досвіду організації безпеки підприємств енергетичного сектора доцільним є формування типової концепції захисту, яка може бути використана як методична основа для розроблення систем безпеки різних об'єктів.

Типова концепція захисту вразливих об'єктів може включати декілька взаємопов'язаних структурних складових, кожна з яких спрямована на вирішення окремих завдань забезпечення безпеки. Для наочного відображення взаємозв'язку основних елементів запропонованої концепції на рис. 1 наведено узагальнену структурну схему формування системи захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Першим етапом є **аналіз загроз та можливих сценаріїв атак**, що передбачає визначення потенційних способів ураження об'єкта критичної інфраструктури, зокрема застосування БпЛА, ракетного озброєння, диверсійних дій або кібернетичних атак [5–7]. Це дозволить визначити найбільш імовірні сценарії впливу на об'єкт та сформулювати відповідні заходи протидії.

Другим важливим елементом концепції є **характеристика об'єктів, що підлягають захисту**. На цьому етапі формується типова модель вразливого об'єкта з урахуванням площі території, конфігурації периметра, особливостей інженерних систем, мереж електроживлення, режиму функціонування та інших параметрів, що можуть впливати на побудову системи захисту.

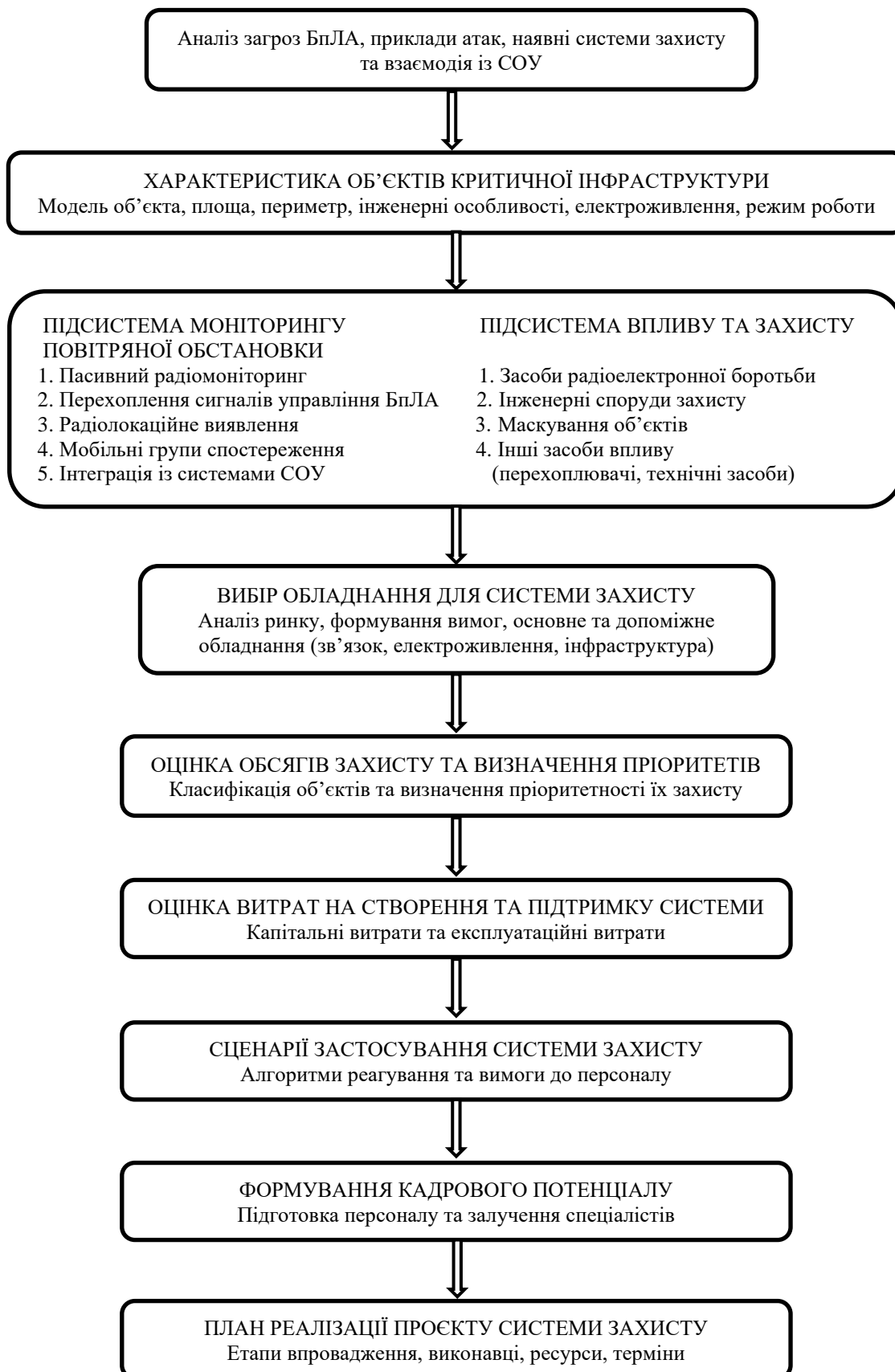


Рис. 1. Узагальнена структура типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури

Як приклад об'єкта критичної інфраструктури можна розглядати підприємства енергетичного та видобувного сектору, зокрема газовидобувні комплекси. Їх особливістю є значна площа території, наявність великої кількості технологічного обладнання та безперервний режим функціонування, що підвищує їх вразливість до атак із застосуванням БпЛА або диверсійних дій.

У зв'язку з цим під час формування системи захисту для таких об'єктів особливу увагу доцільно приділяти організації систем раннього виявлення повітряних загроз, захисту ключових технологічних вузлів та забезпеченню взаємодії з підрозділами Сил оборони України (СОУ).

Наступним елементом є **формування підсистеми моніторингу повітряної обстановки**, яка може включати засоби пасивного контролю електромагнітного спектра, системи виявлення сигналів управління БпЛА, радіолокаційні засоби спостереження, а також бути інтегрованою із системами ситуаційної обізнаності СОУ (за її наявності). Використання таких засобів дозволяє забезпечити своєчасне виявлення повітряних загроз та підвищити ефективність реагування на можливі атаки.

Важливим елементом є **формування підсистеми впливу на ворожі БпЛА та підсистеми пасивного захисту**, до складу яких можуть входити засоби радіоелектронного подавлення, інженерні споруди захисту, системи маскування, а також інші технічні засоби протидії повітряним загрозам. Узагальнений алгоритм реагування системи захисту на виявлення ворожих БпЛА має такий вигляд:

- 1) виявлення загрози;
- 2) ідентифікація типу БпЛА;
- 3) оцінювання рівня загрози;
- 4) прийняття рішення щодо реагування;
- 5) застосування засобів протидії (радіоелектронної боротьби / інших засобів нейтралізації);
- 6) оцінювання результатів реагування.

Окремим напрямом є **вибір технічного обладнання для побудови системи захисту**, що передбачає формування вимог до технічних засобів, аналіз доступних рішень на ринку та визначення найбільш ефективних варіантів їх застосування.

Також важливим елементом концепції є **визначення пріоритетів захисту об'єктів**, зокрема оцінювання критичності різних елементів інфраструктури та встановлення черговості впровадження заходів безпеки з урахуванням обмеженості ресурсів.

Завершальним етапом формування концепції є **оцінювання технічної та економічної ефективності системи захисту**, що включає визначення орієнтовних капітальних та експлуатаційних витрат на створення і підтримку систем безпеки, а також оцінювання доцільності впровадження окремих технічних рішень.

Отже, запропонована структура типової концепції дозволяє систематизувати основні напрями забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та створює основу для подальшого розроблення практичних моделей організації їх захисту в умовах сучасних воєнних загроз. Такий підхід ґрунтується на комплексному поєднанні заходів моніторингу повітряної обстановки, технічних засобів протидії загрозам, організаційних заходів безпеки та економічного обґрунтування створення системи захисту.

На відміну від відомих запропонована структура типової концепції забезпечує інтеграцію підсистем моніторингу повітряної обстановки, впливу на БпЛА, пасивного захисту, організаційних заходів та оцінювання ефективності в єдину функціонально узгоджену систему, що дозволяє реалізувати комплексний підхід до організації захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних воєнних загроз.

Висновки

1. Наведений у статті аналіз наукових публікацій показав, що, незважаючи на те, що об'єкти критичної інфраструктури є пріоритетними цілями в умовах сучасної війни, досі відсутній узагальнений підхід до формування комплексної концепції їх захисту.

2. Наукова новизна дослідження полягає у формуванні узагальненої структури типової концепції захисту об'єктів критичної інфраструктури, яка, на відміну від відомих підходів, забезпечує інтеграцію підсистем моніторингу повітряної обстановки, впливу на БпЛА, пасивного захисту, організаційних заходів та оцінювання ефективності в єдину функціонально узгоджену систему.

3. Достовірність отриманих результатів забезпечується аналізом наукових праць, публічних джерел та узагальненням практичного досвіду функціонування об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасної війни, а практична цінність роботи полягає в можливості використання запропонованого підходу як методичної основи для розроблення систем захисту об'єктів різних типів з урахуванням їх функціональних особливостей, рівня критичності та характеру загроз.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення моделей оцінювання технічної та економічної ефективності систем захисту об'єктів критичної інфраструктури, а також на створення типових моделей організації їх захисту з урахуванням специфіки різних галузей та умов функціонування.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Аналіз стану розвитку питання захисту об'єктів критичної інфраструктури з використанням інженерних боєприпасів. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/90e1/ecac6d9deb28362c03111c3a5777290c984d.pdf> (дата звернення: 10.01.2026).
2. Застосування безпілотних технологій для охорони об'єктів критичної інфраструктури. URL: https://www.researchgate.net/publication/391692931_zastosuvanna_bezpilotnih_tehnologij_dla_ohoroni_ob'ektiv_kriticnoi_infrastrukturi (дата звернення: 12.01.2026).
3. Ліла Є. Аналіз засобів захисту критичної інфраструктури під час агресії з боку рф. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/25669/1/Ліла%20Євген.pdf> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Системний підхід до оцінювання ефективності системи захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах протидії ураженню їх засобами повітряного нападу. URL: <http://znp.dndia.org.ua/index.php/znp/article/view/99/127> (дата звернення: 15.01.2026).
5. Науково-методичний підхід щодо оцінювання безпеки критичної інфраструктури на основі комплексу засобів захисту її об'єктів від БпЛА і крилатих ракет / С. М. Чумаченко, О. П. Кутовий, В. А. Попель та ін. // Вчені записки Таврійського нац. ун-ту ім. В. І. Вернадського.

Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34 (73), № 1. С. 144–154. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/22>

6. Комплексний підхід до визначення рівня безпеки критичної енергетичної інфраструктури на основі інтегральної системи захисту її об'єктів від БПЛА та крилатих і балістичних ракет / С. М. Чумаченко, О. П. Кутовий, О. Г. Гуйда та ін. // Вчені записки Таврійського нац. ун-ту ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34 (73), № 2 (1). С. 261–267. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/41>

7. Особливості використання методу, що базується на оцінюванні спроможностей, для вирішення завдань захисту об'єктів критичної інфраструктури України від нападу з повітря / М. Денсжкін, І. Романенко, В. Башинський, Т. Побережець // Military science. 2025. Vol. 3, № 1. С. 353–364. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/milsc_2025_3_1_30 (дата звернення: 10.01.2026).

8. Щодо питання оцінювання вразливості об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану. URL: <https://sts.nangu.edu.ua/article/view/336731> (дата звернення: 10.02.2026).

9. European Commission. European Programme for Critical Infrastructure Protection (EPCIP). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52006DC0786> (last accessed: 14.01.2026).

10. NATO. Resilience and Critical Infrastructure Protection. URL: https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_132722.htm (last accessed: 10.02.2026).

11. Information Sharing and Analysis Center (ISAC). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Information_Sharing_and_Analysis_Center (last accessed: 10.01.2026).

Стаття надійшла до редакції 19.03.2026.

Прийнято до друку 20.04.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. *Analiz stanu rozvytku pytannia zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury z vykorystanniam inzhenernykh boieprypasiv [Analysis of the State of Development of the Issue of Protecting Critical Infrastructure Objects Using Engineering Munitions]*. (n. d.). Retrived from <https://pdfs.semanticscholar.org/90e1/ecac6d9deb28362c03111c3a5777290c984d.pdf> [in Ukrainian].
2. *Zastosuvannia bezpilotnykh tekhnolohii dlia okhorony ob'ektiv krytychnoi infrastruktury. [Application of Unmanned Technologies for the Protection of Critical Infrastructure Facilities]*. (n. d.). Retrived from https://www.researchgate.net/publication/391692931_zastosuvanna_bezpilotnih_tehnologij_dlia_ohoroni_obektiv_kriticnoi_infrastruktury [in Ukrainian].
3. Lila, Ye. (n. d.). *Analiz zasobiv zakhystu krytychnoi infrastruktury pid chas ahresii z boku rf [Analysis of Critical Infrastructure Protection Tools During the Aggression of the rf]*. Retrived from <http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/25669/1/Lila%20Ievhen.pdf> [in Ukrainian].
4. *Systemnyi pidkhid do otsiniuvannia efektyvnosti systemy zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh protydii urazhenniu yikh zasobamy povitrianoho napadu [System Approach to Assessing the Effectiveness of the Critical Infrastructure Protection System under Conditions of Countering Air Attack Weapons]*. (n. d.). Retrived from <http://znp.dndia.org.ua/index.php/znp/article/view/99/127> [in Ukrainian].

5. Chumachenko, S. M., Kutovyi, O. P., & Popel, V. A., et al. (2023). Naukovo-metodychnyi pidkhid shchodo otsiniuvannya bezpeky krytychnoi infrastruktury na osnovi kompleksu zasobiv zakhystu yii ob'ektiv vid BpLA i krylatykh raket [Scientific and Methodological Approach to Assessing the Security of Critical Infrastructure Based on a Complex of Protection Means Against UAVs and Cruise Missiles]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho nats. un-tu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky [Scientific Notes of V. I. Vernadsky Tavriya National University. Series: Technical Sciences]*, 34 (73), 1, 144–154. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/22> [in Ukrainian].
6. Chumachenko, S. M., Kutovyi, O. P., Huida, O. H. et al. (2023). Kompleksnyi pidkhid do vyznachennia rivnia bezpeky krytychnoi enerhetychnoi infrastruktury na osnovi intehralnoi systemy zakhystu yii ob'ektiv vid BpLA ta krylatykh i balistychnykh raket [Comprehensive Approach to Determining the Security Level of Critical Energy Infrastructure Based on an Integrated System of Protection Against UAVs and Cruise and Ballistic Missiles]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho nats. un-tu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky [Scientific Notes of V. I. Vernadsky Tavriya National University. Series: Technical Sciences]*, 34 (73), 2 (1), 261–267. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/41> [in Ukrainian].
7. Dieniezhkin, M., Romanenko, I., Bashynskiy, V., & Poberezhets, T. (2025). Osoblyvosti vykorystannia metodu, shcho bazuietsia na otsiniuvanni spromozhnosti, dlia vyrishennia zavdan zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy vid napadu z povitria [Features of Using a Capability-Based Assessment Method for Solving the Tasks of Protecting Critical Infrastructure Objects of Ukraine from Air Attack]. *Military science*, 3, 1, 353–364. Retrived from http://nbuv.gov.ua/UJRN/milsc_2025_3_1_30 [in Ukrainian].
8. Shchodo pytannia otsiniuvannya vrazlyvosti ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh voiennoho stanu [On the Issue of Assessing the Vulnerability of Critical Infrastructure Facilities under Martial Law Conditions]. (n. d.). Retrived from <https://sts.nangu.edu.ua/article/view/336731> [in Ukrainian].
9. European Commission. European Programme for Critical Infrastructure Protection (EPCIP). (n. d.). Retrived from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52006DC0786>
10. NATO. Resilience and Critical Infrastructure Protection. (n. d.). Retrived from https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_132722.htm
11. Information Sharing and Analysis Center (ISAC). (n. d.). Retrived from https://en.wikipedia.org/wiki/Information_Sharing_and_Analysis_Center

V. A. Kaptur, Y. P. Podkaliuk

FORMATION AND SUBSTANTIATION OF THE STRUCTURE OF A TYPICAL CONCEPT FOR THE PROTECTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES UNDER MODERN WARFARE CONDITIONS

The paper addresses the problem of ensuring the protection of critical infrastructure facilities under conditions of modern military threats. The main factors affecting the level of security of such facilities are identified, including the use of air attack means (in particular, unmanned aerial vehicles), sabotage activities, and other destructive impacts. An analysis of

scientific and public sources that consider approaches to assessing the level of protection and developing security systems for such facilities is also carried out.

The impact of modern military threats on the functioning of strategically important elements of state infrastructure, including energy enterprises, extractive industry facilities, transport hubs, and communication systems, is examined. The role of unmanned aerial vehicles as one of the key means of modern warfare is analyzed, the use of which significantly increases the risks of disruption in the functioning of critical infrastructure facilities.

Based on the conducted analysis, the necessity of forming a typical concept for the protection of critical infrastructure facilities is substantiated. Such a concept can be used as a methodological basis for the development of integrated security systems under modern warfare conditions. The paper proposes the structure of this concept, which includes threat analysis, analysis of attack scenarios and existing protection systems, assessment of the facility from the perspective of its engineering characteristics, formation of subsystems for airspace monitoring, counteraction to unmanned aerial vehicles and passive protection, selection of equipment, assessment of protection scope and prioritization, organizational security measures, and evaluation of the effectiveness of the protection system.

The aim of the study is to develop and substantiate the structure of a typical concept for the protection of critical infrastructure facilities under modern military threats.

The obtained results can be used in the development of protection programs for vulnerable facilities and in the formulation of practical recommendations aimed at increasing their resilience to modern threats.

Keywords: *critical infrastructure; infrastructure protection; military threats; unmanned aerial vehicles; security systems; protection concept.*

В. О. Єгоров, Ph. D.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-1738-1375>

Ю. І. Запорожченко

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0000-0407-163X>

В. О. Тарасенко

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0005-6267-9455>

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДСИСТЕМИ ПОШУКУ АВТОМАТИЗОВОГО КОМПЛЕКСУ РАДІОРОЗВІДКИ

Функціонування системи управління військами й озброєнням ґрунтується на безперервній роботі засобів зв'язку, радіотехнічного забезпечення та різноманітних радіоелектронних комплексів, тому з урахуванням досвіду сучасних бойових дій, можна стверджувати, що радіоелектронна розвідка є найбільш інформативним та ефективним видом воєнної розвідки.

Сучасні системи радіорозвідки функціонують в умовах високої щільності передавачів, завадових впливів та апріорної невизначеності параметрів сигналів. Це потребує створення алгоритмічно й апаратно ефективних автоматизованих систем пошуку, здатних забезпечувати виявлення, аналіз та класифікацію широкого спектра радіосигналів у частотно-часовому просторі за обмежених ресурсів.

Стрімке зростання складності, інтенсивності та динамічності сучасного радіоефіру зумовлює необхідність удосконалення методів автоматизованого пошуку, розпізнавання та технічного аналізу сигналів. Системи радіорозвідки, що функціонують у військових, спеціальних або цивільних інформаційно-телекомунікаційних середовищах, мають забезпечувати надійну ідентифікацію широкого спектра джерел радіовипромінювання в умовах високої невизначеності та змішаних завадових впливів.

Пошук сигналів у ході ведення радіорозвідки має ієрархічний характер, що полягає в досягненні кінцевої мети шляхом послідовного виконання процедур від нижчих рівнів до вищих. Зокрема, це може бути енергетичний пошук сигналів, вимірювання їх параметрів та характеристик, класифікація джерел радіовипромінювання, ідентифікація об'єктів тощо.

За таких умов традиційні алгоритми пошуку, що ґрунтуються на статичних процедурах виявлення та фіксованих порогових критеріях, не забезпечують необхідних показників ефективності. Тому актуальною є побудова формалізованої, математично обґрунтованої та системно оптимізованої моделі автоматизованого комплексу пошуку,

яка враховує багатовимірну природу сигналів, стохастичні характеристики середовища та обмеження апаратно-програмної реалізації.

Об'єктом дослідження є процес пошуку як метод добування розвідувальної інформації, а предметом – підсистема пошуку автоматизованого комплексу радіорозвідки, що реалізується на основі сучасних алгоритмів панорамного огляду спектра, енергетичного виявлення, виділення ознак та інтелектуальних процедур селекції потоків тривоги.

Отримані наукові результати спрямовані на підвищення оперативності та достовірності ведення радіоелектронної розвідки за рахунок автоматизації ключових етапів оброблення радіосигналів, зменшення навантаження на оператора, підвищення ймовірності виявлення сигналів низької інтенсивності та мінімізації хибних тривог у складних умовах радіообстановки.

Застосування запропонованих підходів забезпечує стандартизацію дій, скорочення часу реакції, підвищення точності прийняття рішень та узгодженість роботи різнорівневих елементів системи радіомоніторингу, що в комплексі істотно підвищує ефективність виконання завдань радіоелектронної розвідки.

Ключові слова: радіоелектронна розвідка; пошук і пропуск сигналу; хибна тривога; автоматизоване оброблення сигналів; спеціальне програмне забезпечення; матеріали радіоперехоплення; пост радіоперехоплення; автоматизований комплекс пошуку; частотно-часовий простір.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні умови ведення бойових дій характеризуються різким зростанням значущості інформаційного забезпечення процесів управління військами, зокрема за рахунок використання технічних засобів радіоелектронної розвідки. Інтенсивне застосування різнорідних систем зв'язку, управління та передачі даних формує складну й динамічну радіоелектронну обстановку, у межах якої підрозділи радіоелектронної розвідки змушені працювати з великими обсягами сигналів у режимі жорстких часових обмежень. За таких умов ефективність управлінських рішень безпосередньо залежить від здатності оперативно отримувати, обробляти та узагальнювати дані про радіоелектронну обстановку в реальному часі.

Відомі підходи до автоматизації процесу пошуку та класифікації сигналів не в повній мірі відповідають вимогам сучасної війни, оскільки значна частина операцій виконується вручну або з обмеженим рівнем автоматизації. Це зумовлює залежність результатів від людського фактора, збільшує тривалість оброблення даних та ускладнює своєчасне реагування на зміну радіоелектронної обстановки. Особливі труднощі виникають під час роботи з короткотривалими, адаптивними або малопотужними сигналами, виявлення та аналіз яких потребують значних часових і обчислювальних ресурсів.

Додатковим ускладнювальним фактором є необхідність одночасної роботи з різними типами радіосигналів та забезпечення безперервного контролю значних ділянок частотного діапазону. За відсутності автоматизованих механізмів попереднього оброблення, селекції та систематизації інформації оператори не мають можливості виконувати комплексний аналіз радіоелектронної обстановки та потоку виявлених

сигналів у реальному масштабі часу. Це негативно впливає на повноту та достовірність розвідувальних відомостей, а також на швидкість їх доведення до органів управління.

Отже, у загальному вигляді проблема полягає в невідповідності між зростаючими обсягами радіовипромінювань у контрольованому просторі та обмеженими можливостями їх оперативного оброблення наявними засобами, що обумовлює потребу у створенні автоматизованого методу пошуку, виявлення та класифікації радіосигналів у реальному часі, який забезпечить:

- оброблення великих масивів розвідувальної інформації;
- скорочення часу на виявлення та аналіз сигналів;
- зменшення залежності результатів від суб'єктивних дій оператора;
- підвищення достовірності визначення параметрів сигналів;
- оперативне формування розвідувальних повідомлень.

Розв'язання зазначеної проблеми потребує розроблення та впровадження спеціального програмного забезпечення, яке реалізує автоматизовані алгоритми оброблення сигналів радіоперехоплення та встановить єдиний порядок дій особового складу підрозділів радіоелектронної розвідки на всіх етапах виконання завдань. Запровадження такого підходу створить передумови для підвищення ефективності функціонування системи радіоелектронної розвідки в умовах сучасних бойових дій [5–7, 15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика автоматизації процесів радіоелектронної розвідки та оброблення сигналів радіоперехоплення є предметом досліджень багатьох вітчизняних і закордонних науковців. У працях українських авторів, зокрема В. І. Ткачука, О. М. Короля, С. О. Гриневича, розглянуто загальні принципи організації радіоелектронної розвідки, особливості функціонування постів радіоперехоплення та роль технічних засобів у системі інформаційного забезпечення управління військами. Дослідники підкреслюють необхідність підвищення оперативності отримання та оброблення розвідувальної інформації, водночас питання комплексної автоматизації цих процесів залишаються розкритими частково. У публікаціях багато уваги приділено фрагментарним питанням побудови підсистем виявлення, спектрального аналізу чи класифікації сигналів, однак комплексні моделі пошукового процесу, а також системні принципи побудови автоматизованих систем пошуку (АСП) лишаються недостатньо формалізованими [21, 22].

У роботах А. І. Павлова, Ю. В. Кириленка, М. О. Пархоменка досліджено методи спектрального та часово-частотного аналізу радіосигналів, а також алгоритми їх виявлення в умовах шумів і завад. Запропоновані підходи формують теоретичну основу первинного оброблення сигналів, однак переважно орієнтовані на лабораторні або спрощені умови застосування та не враховують особливостей багатосигнального середовища і жорстких часових обмежень, характерних для реальних умов бойового застосування [23–26].

Значний внесок у розвиток теорії оброблення сигналів зроблено закордонними науковцями, зокрема S. Naykin, A. Oppenheim, R. Gallager, у своїх працях вони розглядають статистичні, адаптивні та кореляційні методи аналізу сигналів. Ці дослідження заклали фундамент для створення автоматизованих систем виявлення та оцінювання параметрів

сигналів, однак у більшості випадків не враховують специфіки функціонування підрозділів радіоелектронної розвідки в умовах сучасних бойових дій [25–30].

Окрему групу становлять наукові публікації, присвячені застосуванню інтелектуальних методів оброблення радіосигналів, зокрема з використанням алгоритмів машинного навчання та елементів штучного інтелекту. S. Haykin, J. Mitola, Y. Zeng, K. Letaief демонструють можливості автоматичної класифікації та ідентифікації сигналів, проте зазначають обмеження, пов'язані з високими обчислювальними вимогами, необхідністю великих навчальних вибірок та відсутністю стандартизованих методик практичного застосування у військових підрозділах [6, 9, 13, 27–30].

Аналіз сучасних вітчизняних публікацій також свідчить про значущість питань з організації радіоелектронної розвідки, підготовки особового складу та узагальнення бойового досвіду застосування технічних засобів (І. П. Ляшенко, О. В. Сидоренко). Водночас проблема розроблення цілісного автоматизованого методу реєстрації та аналізу сигналів радіоперехоплення, що поєднував би алгоритмічне забезпечення з методикою практичного використання спеціального програмного забезпечення, залишається недостатньо дослідженою [21, 30].

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є обґрунтування та побудова математичної моделі підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіорозвідки, яка дозволяє оптимізувати критерії прийняття рішень та підвищити ймовірність виявлення радіосигналів в умовах апріорної невизначеності та складної радіоелектронної обстановки.

Виклад основного матеріалу. Пошук сигналів, як система послідовних дій, передбачає певну невизначеність результату. У разі пошуку сигналів джерел радіовипромінювання (ДРВ) така невизначеність зумовлена низкою факторів: по-перше, невідомим розташуванням сигналу в частотно-часовому просторі (ЧЧП) та в просторі географічних координат; по-друге, наявністю різноманітних завадових впливів, що породжують невизначеність щодо факту наявності сигналу в певній області ЧЧП; по-третє, великою кількістю сторонніх ДРВ, які спричиняють невизначеність щодо належності сигналу до конкретного класу. Отже, результат пошуку має ймовірнісний характер [1, 8–10].

Під час пошуку ДРВ сигнал може бути поданий у загальному вигляді у формі m -вимірного вектора, складовими якого є: частота f_i , час t_i , координати просторового положення ДРВ X_i, Y_i, Z_i , а також інші технічні характеристики та параметри сигналу u_1, u_2, \dots, u_n . Тоді кожний ДРВ може бути описаним вектором:

$$S_i = |f_i, t_i, X_i, Y_i, Z_i, u_1, u_2, \dots, u_n|, \quad (1)$$

а вся сукупність ДРВ, сигнали яких впливають на вхід системи пошуку, – певною множиною $\{S_i\}, i = 1, N$. Мету пошуку в загальному вигляді можна звести до виявлення в множині $\{S_i\}$ деякої підмножини $\{S_j\}, \{S_i\} \in \{S_j\}, j \leq N$.

За рахунок імовірнісного характеру процесу пошуку ДРВ мають поділ множини $\{S_i\}$ на підмножини корисних $\{S_j\}$ та завадових $\{S_k\}$ ДРВ, який супроводжується помилками

першого та другого роду – хибним розпізнаванням і втратами. За таких умов як узагальнений показник ефективності пошуку доцільно використовувати ймовірність P_{Π} правильного розділення підмножин корисних і завадових ДРВ у разі заданого рівня помилок розділення за допустимий час пошуку t_{Π} :

$$P_{\Pi} = [(\{S_{jkl}\} \cap \{S_k\}) \cup (\{S_{kkl}\} \cap \{S_j\})] \leq \{S_l\}_{\text{доп}} \forall j, k, l \in i, \text{ якщо } t_{\Pi} \leq t_{\text{доп}}, \quad (2)$$

де $\{S_j\}, \{S_k\}$ – апіорні, а $\{S_{jkl}\}, \{S_{kkl}\}$ – апостеріорні множини корисних і завадових ДРВ за результатами пошуку;

$\{S_l\}$ – множина помилок розділення.

Аналіз умов ведення пошуку, фізичної природи та особливостей сигналів зумовлює, що будь-який алгоритм пошуку містить обов'язкові процедури:

- енергетичне виявлення сигналів ДРВ у частотно-часовому просторі;
- вимірювання параметрів сигналів для формування їх образу (опису);
- порівняння отриманого образу з еталонними описами класів та ухвалення рішення;
- інформаційну взаємодію із суб'єктом управління.

Кожна з перелічених процедур може бути реалізована різними способами (зокрема комбінованими), проте незмінними залишаються ключова мета пошуку та послідовність операцій. Кожна наступна операція може бути виконана лише після успішного завершення попередньої, а ефективність пошуку загалом визначається якістю виконання всіх етапів, тобто частковими показниками ефективності:

- енергетичного виявлення $P_{\text{вияв}}$;
- оброблення виявлених сигналів ДРВ для виділення ознак $P_{\text{обсл/вияв}}$;
- класифікації сигналів (ДРВ) за отриманими ознаками $P_{\text{кл/обсл}}$.

Часткові показники $P_{\text{вияв}}, P_{\text{обсл/вияв}}, P_{\text{кл/обсл}}$ інтерпретуються як безумовні та умовні ймовірності правильного виконання відповідних операцій: виявлення, оброблення та класифікації сигналів [9, 11, 13].

Отже, узагальнений показник ефективності пошуку може бути виражений через часткові показники процедур пошуку у вигляді певного функціонала:

$$P_{\Pi} = F(P_{\text{вияв}}, P_{\text{обсл/вияв}}, P_{\text{кл/обсл}}, t_{\Pi} \leq t_{\text{доп}}). \quad (3)$$

За умови обов'язкової послідовності процедур пошуку узагальнений показник ефективності може бути поданий у вигляді добутку часткових показників, які залежать здебільшого від структури системи та особливостей алгоритму пошуку:

$$P_{\Pi} = P_{\text{вияв}} P_{\text{обсл/вияв}} P_{\text{кл/обсл}}. \quad (4)$$

Вираз (4) показує, що для підвищення ефективності пошуку необхідно поліпшувати часткові показники ефективності складових операцій пошукового процесу. Очевидно, що для забезпечення необхідного значення узагальненого показника ефективності пошуку кожен із часткових показників повинен задовольняти умову

$$P_{i,j} \geq \sqrt[k]{P_{\Pi \text{ доп}}}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (5)$$

Для здійснення пошуку передусім необхідно сформулювати його конкретну мету. Вихідними даними для його організації є апріорні характеристики ДРВ, відомі оператору.

Вихідні дані задаються у формі обмежень на простір пошуку, які визначають область невизначеності (діапазон частот Φ_0 , який формалізується як різниця верхньої та нижньої межі сканування $\Phi_0 = f_{max} - f_{min}$ або виражається через кількість каналів $\Phi_0 = l * \Delta F_D$, де l – кількість частотних каналів, а ΔF_D – смуга пропускання одного елементарного каналу; динамічний діапазон рівнів сигналу D_p , час пошуку $t_{п}$, кількість класів $N_{кл}$, кількість та природа ознак $M_{пр}$ тощо), а також вимог щодо точності (роздільна здатність за частотою Δf та часом Δt , точність вимірювання параметрів σ_i).

Ефективність виявлення сигналу залежить від способу огляду області невизначеності ЧЧП та обраного алгоритму виявлення сигналу на фоні завад. Огляд елементів ЧЧП може виконуватися різними способами:

паралельним опрацюванням усіх елементів простору;

послідовним їх переглядом (елемент за елементом) у заданому порядку;

комбінованим способом, групами елементів чи випадковим зверненням до елементів ЧЧП.

Незалежно від способу огляду повинно бути прийняте рішення про наявність або відсутність сигналу – енергетичне виявлення. Принципово можливим є безпосереднє розв'язання задачі виявлення (вимірювання) певного параметра (або групи параметрів) сигналу в кожному проміжку ЧЧП із подальшою класифікацією, але, оскільки смуга частот і тривалість сигналу, як правило, не збігаються з відповідними параметрами одного елемента ЧЧП, стає неможливим виконання оптимальної фільтрації сигналу та, відповідно, ефективного виявлення й класифікації. Крім того, часові витрати на оброблення в ході вимірювання параметрів сигналу визначаються необхідною точністю вимірювання та є значно більшими, ніж у разі енергетичного виявлення. Це, у свою чергу, різко знижує відносну пропускну здатність системи пошуку.

Вимірювання параметрів сигналу, що використовують як ознаки розпізнавання ДРВ, доцільно виконувати після енергетичного виявлення. Така послідовність операцій суттєво скорочує кількість проміжків ЧЧП, які необхідно обробити для виділення ознак, забезпечує раціональне використання ресурсів системи пошуку та дозволяє здійснювати якісну фільтрацію сигналів. Виділені активні сусідні проміжки ЧЧП групуються в ділянки простору, зайняті сигналами ДРВ. Потім оцінюються їхні параметри (ширина смуги частот, середня частота), після чого формується черга на вимірювання параметрів сигналів.

Вимірювання параметрів кожного сигналу повинно бути виконане за час, що не перевищує його тривалості, незалежно від того, скільки ознак використовується для розпізнавання. В умовах впливу завад точність оцінювання параметра сигналу залежить як від алгоритму оцінювання, так і від тривалості реалізації. Чим довша оброблювана реалізація, тим точніша оцінка. З іншого боку, час оцінювання параметрів визначає пропускну спроможність системи пошуку. Для задоволення суперечливих вимог до точності оцінки сигналів та пропускну спроможності системи пошуку в умовах обмеженої тривалості сигналів найчастіше доводиться обирати компромісне значення часу обслуговування $t_{обсл}$.

Для вирішення завдань пошуку як ознаки розпізнавання використовуються спектральні й часові характеристики сигналів та їхні структурні особливості. Їхня специфіка змушує реалізувати окремі вимірювачі для спектральних і часових параметрів із різними алгоритмами оброблення сигналів. З одного боку, це призводить до певної апаратної надмірності, а з іншого – дає змогу скоротити час виділення ознак у разі паралельного оброблення сигналу різними вимірювачами. У складі системи пошуку виділяються автоматизовані робочі місця (АРМ) частотно-фазового та структурно-часового аналізу сигналів. Вибір того чи іншого тракту оброблення сигналу здійснюється напівавтоматично оператором АРМ.

Основними вимогами до параметрів та характеристик сигналів, що використовуються як ознаки розпізнавання, є їхня інформативність з погляду класифікації та можливість подання у формі, зручній для роботи класифікатора.

За отриманим у результаті аналізу формалізованим описом сигналу здійснюється його класифікація, процедура якої зводиться до порівняння отриманого опису сигналу з еталонними описами класів та ухвалення рішення про його належність до одного з класів. При цьому, залежно від поставленої мети, можуть вирішуватися різноманітні завдання:

- розпізнавання видів передач, екземплярів джерел, типів ДРВ;
- розкриття джерел розвідданих тощо.

Вирішальне правило класифікації визначається оператором. У радіорозвідувальних АСП, як правило, реалізується баєсова стратегія оцінювання належності сигналу до певного класу та принцип неостаточних рішень. Право ухвалення остаточного рішення належить оператору, для чого йому надається інформація про ймовірність належності сигналу до того чи іншого класу. Крім того, оператору зазвичай надходять результати технічного аналізу сигналів у вигляді числових або графічних характеристик. Ці дані використовуються для ухвалення рішення та для навчання системи.

Основними елементами АСП є (рис. 1):

- енергетичний виявлювач (ЕВ);
- підсистема оброблення сигналів, технічного аналізу та виділення ознак (ПОС);
- підсистема оброблення інформації (ПОІ);
- підсистема відображення результатів (ПВР);
- підсистема контролю та управління технічними засобами (ПКУ).

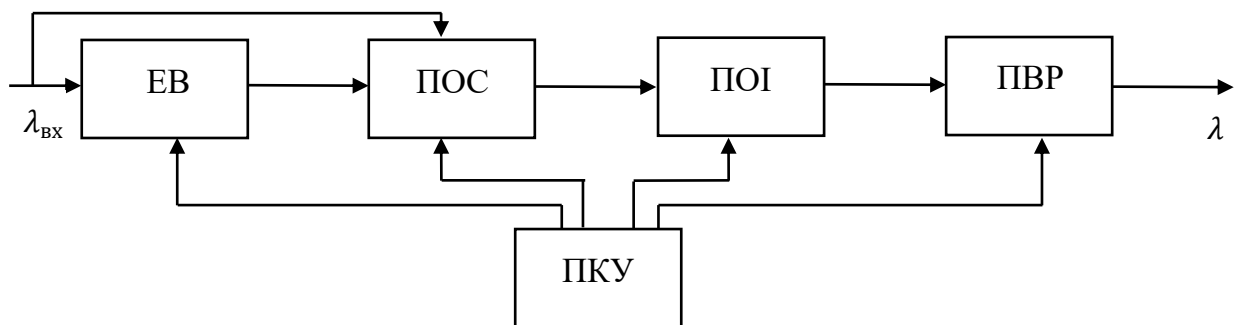


Рис. 1. Структурна схема АСП сигналів [31]

ПОС і ПОІ входять до комплексу розпізнавання.

ЕВ виконує завдання розв'язання невизначеності щодо наявності сигналів у ЧЧП. Його функції полягають у огляді частин ЧЧП, що складають область невизначеності, встановленні факту наявності або відсутності сигналів у контрольованій області простору пошуку, формуванні сигналів цілевказання для підсистеми виділення ознак або оператора. У низці випадків енергетичне виявлення може вирішувати завдання виявлення з класифікацією за найпростішими ознаками сигналу, наприклад, за його типом (неперервний аналоговий чи дискретний), ознакою новизни, тривалістю, шириною спектра.

Структура виявлювача визначається наявними апріорними даними про параметри сигналу. Слід зазначити, що статистичні критерії виявлення відомого та невідомого сигналу ідентичні. Відмінність полягає лише в тому, що в першому випадку вирішальне правило ґрунтується на основі багатовимірних умовних щільностей розподілу всіх відомих параметрів, а в другому – використовується одновимірна умовна щільність розподілу амплітуд.

У ході пошуку вирішується завдання виявлення повністю невідомого сигналу. Припускається лише, що він зосереджений в обмеженій смузі частот ΔF_c і є вузькосмуговим, тобто виконується умова $f_c \gg \Delta F_c$. Завдання синтезу оптимального виявлювача зводиться до мінімізації ймовірностей хибних рішень першого та другого роду: хибних тривог $P_{хт}$ та пропусків сигналу $P_{пс}$, тобто

$$P_{пр} = P_{хт} + P_{пс} = \min \left[p \int_{u_0}^{\infty} \omega(u/0) du + q \int_0^{u_0} \omega(u/1) du \right], \quad (6)$$

де $\omega(u/0)$, $\omega(u/1)$ – щільності розподілу амплітуд шуму та суміші сигнал/шум відповідно;

p і q – апріорні ймовірності наявності та відсутності сигналу на проміжку ЧЧП;

u_0 – пороговий рівень прийняття рішення.

Критерії прийняття рішення полягають у порівнянні відношення правдоподібності з деяким порогом $R_{п}$, перевищення якого означає факт виявлення сигналу:

$$\omega(u/1)/\omega(u/0) > R_{п}. \quad (7)$$

Для критерію максимальної правдоподібності, ідеального спостерігача та середнього ризику поріг прийняття рішення повинен дорівнювати 1, q/p , $q\P_1/q\P_2$ відповідно. Тут

Π_1 – вартість втрат, зумовлена хибними тривогами, а Π_2 – пропуском сигналу. Для критерію Неймана – Пірсона поріг прийняття рішення вибираємо з умови забезпечення рівня хибних тривог, що не перевищує допустимого значення:

$$P_{хт} \leq P_{хт \text{ доп}}, \quad R = f(P_{хт \text{ доп}}). \quad (8)$$

Оскільки в практичних завданнях пошуку недопустиме перевантаження класифікатора хибними тривогами, то реальні схеми ЕВ реалізують, як правило, критерій Неймана – Пірсона.

У разі використання будь-якого зі згаданих критеріїв імовірність хибних рішень суттєво залежить від відношення сигнал / шум: чим воно більше, тим менша ймовірність прийняття хибних рішень за фіксованого порога. Тому в практичних схемах виявлювачів вибір порога здійснюється з урахуванням відношення сигнал / шум.

ЕВ наявних АСП реалізовано на базі типових панорамних радіоприймальних пристроїв (РПрП), доповнених одним або кількома спеціальними трактами виявлення та пристроєм логічного оброблення помилок. Тракт виявлення містить вузькосмуговий фільтр, детектор, інтегратор, пороговий пристрій і реалізує таке правило:

$$U(t) = \int_{t-T}^t s^2(\tau) d\tau \geq U_0, \quad (9)$$

де $s(t)$ – обвідна вихідної напруги вузькосмугового фільтра.

Смуга пропускання тракту визначається вимогами до роздільної здатності та швидкості перелаштування панорамного РПрП.

Панорамні РПрП, доповнені такими виявлювачами, реалізують послідовні й паралельно-послідовні процедури огляду ЧЧП. Автоматичне керування перелаштуванням РПрП може здійснюватися різними способами залежно від його конструктивних особливостей та типу ЕВ. Характерні два способи керування: автономний та за командами зовнішнього пристрою керування або ПЕОМ. Перший застосовується в АСП, спроектованих на базі РПрП зі звичайним частотно-модульованим гетеродином, спеціалізованих пристроях оброблення та програмних автоматах. Другий – за використання цифрових обчислювальних машин (ЦОМ) та РПрП із керованими синтезаторами гетеродинних напруг. Спосіб керування визначає і характер інформаційного обміну між виявлювачем та ПОС. У разі апаратної реалізації виявлювача та пристрою оброблення останній видає сигнал дозволу на перелаштування та приймає інформацію про значення частоти налаштування й ознаку помилки або її відсутності на виході виявлювача.

На сьогодні широко застосовують паралельно-послідовні виявлювачі на основі цифрового оброблення сигналів із виходу тракту проміжної частоти панорамного РПрП або широкосмугового низькочастотного виходу. Такий виявлювач ґрунтується на принципі цифрового аналізу спектра групового сигналу в смузі $\Delta\Phi$, фундаментальних теоремах Котельникова, Фур'є та рівності Парсеваля. Уся смуга частот пошуку Φ_0 розбивається на $n = \Phi_0/\Delta\Phi$ ділянок, для кожної з яких виконується алгоритм цифрового спектрального аналізу та виявлення. Ширина смуги $\Delta\Phi$ одночасного аналізу визначається можливостями аналого-цифрового перетворення (АЦП), зокрема його швидкодією та розрядністю, а також можливостями ПЕОМ. При цьому операції алгоритмів дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) або їхніх модифікацій, наприклад, швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), можуть реалізовуватися на спеціальних процесорах або безпосередньо на ПЕОМ [9, 13, 14].

Для повного усунення спотворень у всій смузі аналізованих частот має виконуватися така умова:

$$\tau_{\text{ап}} \leq \frac{1}{2\pi f_B 2^{N-1}}, \quad (10)$$

де $\tau_{\text{ап}}$ – апертурний час (інтервал часу, протягом якого знімається «миттєве» значення амплітуди сигналу);

N – розрядність АЦП.

У разі дискретизації сигналів на проміжній частоті вимоги до апертурного часу посилюються, оскільки верхня гранична частота становить

$$f_{\text{в}} = f_{\text{пч}} + \frac{\Delta\Phi}{2}. \quad (11)$$

При цьому частота дискретизації $f_{\text{д}}$ не повинна бути кратною одній з аналізованих частот для усунення явища мімікрії (накладання частот у спектрі).

Вибір мінімально можливої частоти дискретизації $f_{\text{д}}$ здійснюється з такої умови:

$$f_{\text{д min}} = \frac{2f_{\text{пч}} + \Delta\Phi}{m}, \quad (12)$$

де $m = \text{ent}[(f_{\text{пч}} + \Delta\Phi/2)/\Delta\Phi]$.

Слід зазначити, що за непарного m перетворений у цифрову форму сигнал має спектр, який повністю відповідає спектру безперервного аналога, а в разі парного m – інвертований відносно аналогового сигналу.

Результатом цифрового спектрального аналізу, в основу якого покладено алгоритми ДПФ, є не миттєвий спектр, як в аналогових аналізаторах, а комплексний дискретний спектр реалізації, отриманий за кінцевою кількістю відліків M :

$$a_k = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} h(i)S(i\Delta t) \cos \frac{2\pi ik}{M}; \quad (13)$$

$$b_k = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} h(i)S(i\Delta t) \sin \frac{2\pi ik}{M}, \quad (14)$$

де a_k і b_k – дійсна та уявна частини комплексних коефіцієнтів спектра Фур'є;

$h(i)$ – вагова (віконна) функція;

k – номер гармонічної складової спектра реалізації, що аналізується.

За коефіцієнтами a_k і b_k обчислюємо коефіцієнти спектрів амплітуд C_k та фаз φ_k реалізації, що аналізується:

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \varphi_k = -\text{arctg} \frac{a_k}{b_k}. \quad (15)$$

Інтервал частот між двома сусідніми складовими спектра залежить лише від тривалості реалізації та має величину

$$\Delta F = \frac{1}{T} = \frac{f_{\text{д}}}{M} = \frac{f_{\text{д}} \Delta t_{\text{д}}}{T_p}, \quad (16)$$

де $\Delta t_{\text{д}}$ – інтервал дискретизації;

T_p – тривалість реалізації.

У смузі аналізу міститиметься

$$\Delta\Phi/\Delta F = M/2 \quad (17)$$

складових спектра амплітуд.

Оскільки спектр амплітуд одиначної реалізації обмеженої тривалості є неконсистентною оцінкою спектра випадкового процесу, то для підвищення якості спектрального аналізу здійснюємо усереднення за реалізаціями тривалості T_p або усереднення за частотою на тривалості реалізації $T_p' = N_1 T_p$. За оцінки обираються, відповідно, середні значення коефіцієнтів спектрів амплітуд

$$\bar{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N_1} C_i \quad (18)$$

або середні значення коефіцієнтів \bar{C}_k для N наступних послідовних коефіцієнтів спектра амплітуд

$$\bar{C}_k = \sum_{i=k}^{k+N_1} C_i. \quad (19)$$

Обидва розглянуті методи рівноцінні з погляду зору мінімізації дисперсії оцінки, проте усереднення за часом вимагає менших ресурсів ПЕОМ. Слід зазначити, що усереднення спектральних складових реалізацій дозволяє зменшити окрему середньоквадратичну похибку вимірювання в N_1 разів.

Для розв'язання задач панорамного виявлення сигналів потрібно оцінювати не спектр амплітуд реалізації, а спектральну густину енергії або потужність сигналу. У цьому разі використовуємо квадрати середніх значень коефіцієнтів розкладу Фур'є C_k^2 , для отримання яких потрібні додаткові ресурси ПЕОМ. Середню потужність дискретизованого сигналу, що оцінюється відповідно до теореми Парсеваля, визначаємо як

$$\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} |S(i\Delta t)|^2 = \sum_{k=0}^{M-1} |C(k)|^2. \quad (20)$$

Вона дорівнює сумі потужностей окремих спектральних складових та не залежить від їхніх фаз. Для скорочення часових витрат на цифрове оброблення сигналів у наш час широко застосовують алгоритми ШПФ.

Оптимізація пристрою виявлення зводиться до вибору таких часткових показників розрізнення сигналу та завади, за яких для заданого значення $P_{\text{вияв}}(P_{\text{хт}})$ відношення сигнал / шум є мінімальним, або, за відомого $U_c/U_{\text{ш}}$, – до вибору порога виявлення U_0 , що забезпечує необхідні значення $P_{\text{вияв}}(P_{\text{хт}})$. У разі панорамної побудови виявлювача звернення до частини частотно-часового простору – елементарного каналу зі смугою ΔF_d – відбувається періодично з періодом T_i , а спостереження здійснюється протягом часу

$$\tau_a = T_i/l = T_0 \frac{\Delta F_d}{\Delta\Phi}, \quad (21)$$

де l – кількість каналів.

Отже, для виявлення сигналу необхідне виконання двох умов: збіг налаштування виявлювача з частотою сигналу, коли він наявний на часовому інтервалі $\Delta\tau$, необхідному

для прийняття рішення, та вирізнення сигналу на фоні шуму. Оскільки обидві події мають імовірнісний характер, то ймовірність одиничного виявлення сигналу має такий вигляд:

$$P_{\text{вияв}} = P_{\text{зб}/\Delta\tau} P_{\text{вияв}}(U_0), \quad (22)$$

де $P_{\text{зб}/\Delta\tau}$ – імовірність збігу частоти сигналу з частотою налаштування виявлювача;

$P_{\text{вияв}}(U_0)$ – імовірність виявлення сигналу в шумах, яка залежить від порогового рівня U_0 . У разі експоненційного розподілу тривалостей сигналів імовірність збігу має такий вигляд:

$$\bar{P}_{\text{зб}/\Delta\tau} = \alpha e^{-\beta} (1 - e^{-\frac{1}{\alpha}}), \quad (23)$$

де $\alpha = \frac{\bar{t}_c}{T_0}$ – безрозмірний параметр, що характеризує відносну тривалість сигналу порівняно з періодом огляду всього частотного діапазону;

$\beta = \frac{\tau_a}{\bar{t}_c}$ – параметр, який визначає відносний час спостереження в одному частотному каналі до середньої тривалості самого сигналу;

τ_a – час перегляду частотного каналу;

\bar{t}_c – середня тривалість сигналу;

T_0 – період огляду.

Імовірність $P_{\text{вияв}}(U_0)$ можна знайти як відносний час перебування обвідної $s(t)$ вище деякого порогового рівня U_0 . Для каналів, що періодично стробуються, імовірність виявлення сигналу обчислюємо як відносну частоту викидів $s(t)$ за пороговий рівень:

$$P_{\text{вияв}} = \frac{k_B}{\mu_{\text{СК}}}, \quad (24)$$

де k_B – кількість викидів за пороговий рівень за час пошуку T_H ;

$\mu_{\text{СК}}$ – кількість сканувань, що дорівнює

$$\mu_{\text{СК}} = \frac{T_H}{T_0} = T_H F_{\text{СК}}. \quad (25)$$

Середню кількість хибних викидів за $U_c = 0$ для каналу зі стробуванням за час пошуку розраховуємо в такий спосіб:

$$k_B = P_{\text{хт}}(U_0) \mu_{\text{СК}}. \quad (26)$$

Тоді загальна кількість хибних викидів за одиницю часу у всій смузі огляду становить

$$N_\Phi = P_{\text{хт}}(U_0) \mu_{\text{СК}} l. \quad (27)$$

Імовірність хибних тривог у каналі, виражена через характеристики виявлювача та допустимий рівень хибних тривог, має такий вигляд:

$$P_{\text{хт}} = \frac{N_\Phi}{\mu_{\text{СК}} l} = \frac{N_\Phi T_0}{T_H l} = \frac{N_\Phi \Delta F_{\text{д}}}{T_H F_{\text{СК}} \Phi_0} \quad (28)$$

для порогового рівня

$$U_0 = \sqrt{2 \ln \left(\frac{T_H F_{CK} \Phi_0}{N_{\Phi} \Delta F_d} \right) \sigma_{\text{ш}}^2}. \quad (29)$$

Аналіз виразів (28)–(30) та практичний досвід показують неефективність виявлення за одиничним перевищенням порогового рівня та необхідність використання критеріїв, які краще враховують часову структуру сигналу. До них належить критерій k із n , $k < n$, який полягає в тому, що приймається рішення про наявність сигналу, якщо за фіксовану кількість періодів сканування n мало місце не менше k перевищень порогового рівня в частотному каналі. У разі використанні такого критерію ймовірність виявлення $P_{\text{вияв}(k,n)}$ та хибної тривоги $P_{\text{хт}(k,n)}$ оцінюються за такими виразами:

$$P_{\text{вияв}(k,n)} = \sum_{i=k}^n C_n^i P_{\text{вияв}}^i(U_0) [1 - P_{\text{вияв}}(U_0)]^{n-i}; \quad (30)$$

$$P_{\text{хт}(k,n)} = \sum_{i=k}^n C_n^i P_{\text{хт}}^i(U_0) [1 - P_{\text{хт}}(U_0)]^{n-i}. \quad (31)$$

Перевага логіки « k із n » пояснюється такими факторами: у разі того ж ступеня достовірності виявлення сигналу зменшується необхідне значення ймовірності одиничного виявлення, і за ті ж ймовірності хибної тривоги збільшується допустиме значення ймовірності одиничного хибного викиду, що еквівалентно зниженню порога U_0 . Обидва ці фактори зумовлюють зменшення відношення сигнал/шум, необхідне для отримання заданої ймовірності виявлення сигналу [5, 15–18].

Узагальнюючи викладене вище, комплексну математичну модель підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіоелектронної розвідки можна подати як ієрархічну систему взаємопов'язаних аналітичних співвідношень. Вхідним впливом моделі є багатовимірний потік сигналів джерел радіовипромінювання, що описується просторово-часовими та технічними параметрами у вигляді векторів S_i (1). Процес панорамного огляду та енергетичного виявлення в моделі формалізується через алгоритми цифрового спектрального аналізу (13)–(20) із подальшим застосуванням імовірнісних критеріїв прийняття рішень, зокрема логіки « k із n » (30)–(31), що дозволяє мінімізувати ймовірність хибних тривог $P_{\text{хт}}$. Цільовою функцією запропонованої математичної моделі є узагальнений показник ефективності пошуку $P_{\text{п}}$ (4), який інтегрує часткові ймовірності енергетичного виявлення, виділення ознак та класифікації в умовах заданих обмежень на час аналізу $t_{\text{п}}$ та смугу огляду Φ_0 . Таке системне узагальнення дозволяє аналітично пов'язати апаратні характеристики комплексу з імовірнісними показниками якості добування розвідувальної інформації.

Висновки. Обґрунтовано доцільність автоматизації процесів пошуку сигналів ДРВ в умовах зростання обсягів розвідувальної інформації та обмеженого часу на її оброблення в підрозділах радіоелектронної розвідки.

Розроблена математична модель основних етапів оброблення сигналів теоретично підтверджує можливість підвищення достовірності й оперативності результатів за рахунок автоматизації та зменшення впливу людського фактора, а також створює аналітичне підґрунтя для проведення подальшого імітаційного моделювання системи.

Обґрунтовано математичну модель підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіоелектронної розвідки, яка враховує ієрархічну організацію процесу пошуку, імовірнісний характер виявлення сигналів та вплив завад у складній радіоелектронній обстановці.

Запропоновано узагальнений показник ефективності пошуку, що поєднує часткові показники енергетичного виявлення та оброблення сигналів і дозволяє оптимізувати алгоритми автоматизованого оброблення з урахуванням часових та обчислювальних обмежень.

Отримані результати створюють методичну основу для підвищення оперативності й достовірності радіоелектронної розвідки, зменшення навантаження на оператора та практичної реалізації автоматизованих комплексів пошуку сигналів у сучасних умовах ведення бойових дій [1, 5, 8, 15].

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Бортник Г. Г., Негур А. А. Цифрова обробка радіосигналів у пристроях приймання. Вінниця : ВНТУ, 2020. 212 с.
2. Бортник Г. Г., Кирилюк С. О. Первинна обробка радіосигналів у цифрових приймачах. Вінниця : ВНТУ, 2019. 198 с.
3. Романов О. М., Ніколаєв С. М., Орлюк Є. І. Модель комплексу радіомоніторингу як багатофазної системи масового обслуговування // Радіоелектроніка та системи зв'язку. 2022. Т. 65, № 3. С. 155–164. <https://doi.org/10.3103/S0735272722030050>
4. Гребенюк О. П., Роговець М. А. Застосування просторової обробки в системах радіомоніторингу // Проблеми створення складних інформаційних систем. 2021. № 2. С. 96–104.
5. Козловський В. А., Ковальчук О. В. Автоматизація процесів радіомоніторингу в сучасних системах розвідки // Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. № 4. С. 87–94.
6. Ляшенко В. О., Савченко О. М. Методи виявлення сигналів у складній радіоелектронній обстановці // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2019. № 6. С. 56–63.
7. Шевченко І. В., Пархоменко А. П. Інформаційні технології в системах радіоелектронної розвідки // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2021. № 2. С. 34–41.
8. Stoica P., Moses R. L. Spectral Analysis of Signals. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2005. 452 p.
9. Kay S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing. Vol. II: Detection Theory. Prentice Hall, 1998. 684 p.
10. Proakis J. G., Manolakis D. K. Digital Signal Processing. Pearson Education, 2007. 1104 p.
11. Richards M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill, 2005. 517 p.
12. Skolnik M. I. Radar Handbook. McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
13. Poor H. V. An Introduction to Signal Detection and Estimation. Springer, 1994. 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2341-0>
14. Greco M. S., Gini F., Rangaswamy M. Statistical Analysis of Radar Clutter Data // IEEE TAES. 2012. Vol. 48, No. 3. P. 2342–2361.
15. Pham Q.-V. et al. Intelligent Radio Signal Processing: A Survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 15625–15644.

16. Tandiya N., et al. Deep Predictive Coding Neural Network for RF Anomaly Detection in Wireless Networks // IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403654>
17. Eldar Y. C., Kutyniok G. Compressed Sensing: Theory and Applications. Cambridge Univ. Press, 2012. 544 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794308>
18. Pemasiri A. et al. Automatic Radar Signal Detection and FFT Estimation Using Deep Learning. arXiv:2402.19073, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS63175.2024.10815794>
19. Simon M. K., Divsalar D. Foundations of Digital Communication. Wiley, 2005. 240 p.
20. Haykin S. Cognitive Dynamic Systems. Cambridge Univ. Press, 2012. 310 p.
21. Application of Software for Comprehensive Intelligence Collection in the Interests of Enemy Fire Engagement / S. S. Hatsenko, O. H. Metalidi, S. O. Bohatyrov, I. I. Vasyliayko // Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine. 2024. No. 1 (80). P. 87–93. URL: <https://znp-cvsvd.nuou.org.ua/article/view/305724> (last accessed: 10.03.2026).
22. Ivanov O. V., Kuznietsov D. O., Hryhorak S. V. Indicators for Assessing the Informational Accessibility of Radio Emission Sources in Electronic Intelligence // Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine. 2020. URL: <https://znp-cvsvd.nuou.org.ua/article/view/202212> (last accessed: 15.03.2026).
23. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Pearson, 2010. 1108 p.
24. Gallager R. G. Principles of Digital Communication. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 422 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813498>
25. Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2005. Vol. 23, Iss. 2. P. 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
26. Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio : doctoral dissertation. Stockholm : Royal Institute of Technology, 2000. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8730> (last accessed: 01.03.2026).
27. Letaief K. B., Zhang W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks // Proceedings of the IEEE. 2009. Vol. 97, Iss. 5. P. 878–893. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>
28. Yücek T., Arslan H. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2009. Vol. 11, No. 1. P. 116–130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>
29. O’Shea T. J., Roy T., Clancy T. C. Over-the-Air Deep Learning Based Radio Signal Classification // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2018. Vol. 12, No. 1. P. 168–179. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2018.2797022>
30. The Ukrainian Military: Modernity and Historical Retrospective : Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Kyiv, November 27, 2025. Kyiv : National Defence University of Ukraine, 2025. 356 p. URL: <https://nuou.org.ua/assets/documents/tezy-6-mnpk-2025.pdf> (last accessed: 10.03.2026).

31. Радіоелектронна розвідка: пошук та спостереження : навч. посіб. Київ : НУО України, 2017. 200 с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2026.

Прийнято до друку 20.04.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Bortnyk, H. H., & Nehur, A. A. (2020). *Tsyfrova obrobka radiosyhnaliv u prystroiakh pryimannia [Digital Radio Signal Processing in Receiving Devices]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
2. Bortnyk, H. H., & Kyryliuk, S. O. (2019). *Pervynna obrobka radiosyhnaliv u tsyfrovyykh pryimachakh [Primary processing of radio signals in digital receivers]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
3. Romanov, O. M., Nikolaiev, S. M., & Orliuk, Ye. I. (2022). Model kompleksu radiomonitorynhu yak bahatofaznoi systemy masovoho obsluhovuvannia [Radio Monitoring Complex Model as Multi-Phase Queuing System]. *Visti VNZ. Radioelektronika [Radioelectronics and Communications Systems]*, 65, 3, 145–152. <https://doi.org/10.3103/S0735272722030050> [in Ukrainian].
4. Hrebeniuk, O. P., & Rohovets, M. A. (2021). Zastosuvannia prostorovoi obrobky v systemakh radiomonitorynhu [Application of spatial processing in radio monitoring systems]. *Problemy stvorennia skladnykh informatsiinykh system [Problems of Creation of Complex Information Systems]*, 2, 96–104 [in Ukrainian].
5. Kozlovskiy, V. A., & Kovalchuk, O. V. (2020). Avtomatyzatsiia protsesiv radiomonitorynhu v suchasnykh systemakh rozvidky [Automation of Radio Monitoring Processes in Modern Intelligence Systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku [Systems of Control, Navigation and Communication]*, 4, 87–94 [in Ukrainian].
6. Liashenko, V. O., & Savchenko, O. M. (2019). Metody vyavlennia syhnaliv u skladnii radioelektronni obstanovtsi [Methods of signal detection in a complex radio-electronic environment]. *Naukovi visti NTUU «KPI» [KPI Science News]*, 6, 56–63 [in Ukrainian].
7. Shevchenko, I. V., & Parkhomenko, A. P. (2021). Informatsiini tekhnologii v systemakh radioelektronnoi rozvidky [Information Technologies in Electronic Intelligence Systems]. *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia [Information Technology and Computer Engineering]*, 2, 34–41 [in Ukrainian].
8. Stoica, P., Moses, R. L. (2005). *Spectral Analysis of Signals*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
9. Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Vol. II: Detection Theory*. Prentice Hall.
10. Proakis, J. G., & Manolakis, D. K. (2007). *Digital Signal Processing*. Pearson Education.
11. Richards, M. A. (2005). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill.
12. Skolnik, M. I. (2008). *Radar Handbook*. McGraw-Hill.
13. Poor, H. V. (1994). *An Introduction to Signal Detection and Estimation*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2341-0>

14. Greco, M. S., Gini, F., & Rangaswamy, M. (2012). Statistical Analysis of Radar Clutter Data. *IEEE TAES*, 48, 3, 2342–2361.
15. Pham, Q.-V., et al. (2020). Intelligent Radio Signal Processing: A Survey. *IEEE Access*, 8, 15625–15644.
16. Tandiya, N., et al. (2018). Deep Predictive Coding Neural Network for RF Anomaly Detection in Wireless Networks. In *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403654>
17. Eldar, Y. C., & Kutyniok, G. (2012). *Compressed Sensing: Theory and Applications*. Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794308>
18. Pemasiri, A., et al. (2024). Automatic Radar Signal Detection and FFT Estimation Using Deep Learning. In *17th International Conference on Signal Processing and Communication System (ICSPCS)* <https://doi.org/10.1109/ICSPCS63175.2024.10815794>
19. Simon, M. K., & Divsalar, D. (2005). *Foundations of Digital Communication*. Wiley.
20. Haykin, S. (2012). *Cognitive Dynamic Systems*. Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511818363>
21. Hatsenko, S. S., Metalidi, O. H., Bohatyrov, S. O., & Vasyliayko, I. I. (2024). Application of Software for Comprehensive Intelligence Collection in the Interests of Enemy Fire Engagement. *Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine*, 1 (80), 87–93. URL: <https://znp-cvsd.nuou.org.ua/article/view/305724> (last accessed: 10.03.2026).
22. Ivanov, O. V., Kuznietsov, D. O., & Hryhorak, S. V. (2020). Indicators for Assessing the Informational Accessibility of Radio Emission Sources in Electronic Intelligence. *Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine*. URL: <https://znp-cvsd.nuou.org.ua/article/view/202212> (last accessed: 15.03.2026).
23. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing*. 3rd ed. Pearson.
24. Gallager, R. G. (2008). *Principles of Digital Communication*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813498>
25. Haykin, S. (2005). Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 2, 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380> .
26. Mitola, J. (2000). *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*: doctoral dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8730> (last accessed: 01.03.2026).
27. Letaief, K. B., & Zhang, W. (2009). Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. *Proceedings of the IEEE*, 97, 5, 878–893. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>
28. Yücek, T., & Arslan, H. (2009). A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11, 1, 116–130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>

29. O'Shea, T. J., Roy, T., & Clancy, T. C. (2018). Over-the-Air Deep Learning Based Radio Signal Classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 12, 1, 168–179. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2018.2797022>
30. *The Ukrainian Military: Modernity and Historical Retrospective: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*. Kyiv, November 27, 2025. Kyiv: National Defence University of Ukraine. URL: <https://nuou.org.ua/assets/documents/tezy-6-mnnpk-2025.pdf> (last accessed: 10.03.2026).
31. *Radioelektronna rozvidka: poshuk ta sposterezhenia: navch. posib.* [Electronic Intelligence: Search and Surveillance: textbook]. (2017). Kyiv [in Ukrainian].

V. O. Yehorov, Y. I. Zaporozhchenko, V. O. Tarasenko

MATHEMATICAL MODEL OF THE SEARCH SUBSYSTEM OF THE AUTOMATED RADIO INTELLIGENCE COMPLEX

The functioning of command and control systems for troops and weapons is based on the continuous operation of communication means, radio engineering support, and various radio-electronic complexes. Therefore, considering the experience of modern combat operations, electronic intelligence (ELINT) represents one of the most informative and effective types of military intelligence.

Modern radio intelligence systems operate under conditions of high transmitter density, intensive interference, and a priori uncertainty of signal parameters. This necessitates the development of algorithmically and hardware-efficient automated search systems (ASS) capable of detecting, analyzing, and classifying a wide range of radio signals in the time–frequency domain under limited resource constraints.

The rapid growth in complexity, intensity, and dynamics of the modern radio environment determines the need to improve methods of automated signal search, recognition, and technical analysis. Radio intelligence systems operating in military, special-purpose, or civilian information and telecommunication environments must ensure reliable identification of a wide range of radio emission sources (RES) under conditions of high uncertainty and mixed interference effects.

Signal search in radio intelligence has a hierarchical nature, which consists in achieving the final objective through the sequential execution of procedures from lower to higher levels. In particular, this includes energy-based signal detection, measurement of signal parameters and characteristics, classification of radio emission sources, and object identification.

Under such conditions, traditional search algorithms based on static detection procedures and fixed threshold criteria fail to provide the required performance indicators. Therefore, the development of a formalized, mathematically justified, and system-optimized model of an automated search complex is a relevant task. Such a model must take into account the multidimensional nature of signals, the stochastic characteristics of the environment, and the constraints of hardware-software implementation.

The object of the study is the signal search process as a method of intelligence acquisition. The subject of the study is the search subsystem of an automated radio intelligence complex

implemented on the basis of modern algorithms for panoramic spectrum monitoring, energy detection, feature extraction, and intelligent procedures for alarm stream selection.

The obtained scientific results are aimed at increasing the timeliness and reliability of electronic intelligence operations by automating key stages of radio signal processing, reducing operator workload, increasing the probability of detecting low-intensity signals, and minimizing false alarms under complex radio-environment conditions.

The application of the proposed approaches ensures the standardization of operational actions, reduction of response time, improvement of decision-making accuracy, and coordination of multi-level elements of the radio monitoring system, which together significantly enhances the effectiveness of electronic intelligence task execution.

Keywords: *electronic intelligence; signal search; false alarm; missed detection; automated signal processing; specialized software; radio interception materials; radio interception post; automated search complex; time–frequency domain.*

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.12

УДК 004.4:003.26:681.326.3

І. А. Омельчук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-4674-0058>

І. А. Пількевич, д-р техн. наук, проф.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0001-5064-3272>

Ю. О. Подчашинський, д-р техн. наук, проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

<http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>

В. І. Згуря, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Національне агентство з акредитації України

<http://orcid.org/0009-0008-5525-7037>

МЕТОД ПЕРЕВІРЯННЯ ЕТАЛОНІВ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ

Тривале ведення збройної боротьби Україною проти агресора, а також накопичений міжнародний досвід застосування безпілотних систем у сучасних військових конфліктах стали важливим фактором, який зумовив створення окремого роду військ у складі Збройних Сил України.

У сучасних умовах значущість безпілотних систем у структурі озброєння постійно зростає. Це, у свою чергу, формує потребу в збільшенні обсягів проектування, досліджень зразків прототипів та серійного виробництва новітніх безпілотних комплексів різного призначення. Функціонування таких систем ґрунтується на складних технологічних процесах і включає значну кількість взаємопов'язаних елементів, вузлів та підсистем. Крім того, кожен зразок безпіотної техніки характеризується набором численних параметрів і технічних показників. У зв'язку із цим виникає необхідність проведення комплексних досліджень для підтвердження обґрунтованості прийнятих технічних рішень у нових розробках, а також для ефективного впровадження вже наявних наукових розробок у процесі створення та виробництва безпілотних систем.

Оскільки саме результати випробувань є ключовим джерелом інформації для оцінювання відповідності продукції встановленим вимогам, особливого значення набуває достовірність отриманих даних під час їх проведення. Надійність цих результатів значною мірою залежить від правильності застосованих методів дослідження та рівня компетентності лабораторій, які проводять відповідні вимірювання.

На сучасному етапі одним із загальновизнаних механізмів підтвердження якості та достовірності результатів випробувань є акредитація лабораторій відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO / IEC 17025:2019, який встановлює критерії оцінювання

© І. А. Омельчук, І. А. Пількевич, Ю. О. Подчашинський, В. І. Згуря, 2026

компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій, зокрема щодо забезпечення точності вимірювань та стану їх еталонної бази. Кожне випробування проводиться з використанням засобів вимірювальної техніки – еталонів, що дозволяють виміряти або відтворити відповідні фізичні величини, які характеризують параметри досліджуваних зразків озброєння. Відповідно, кожен із таких засобів вимірювальної техніки повинен мати достатню точність для об'єктивності випробувань. У контексті впровадження стандартів НАТО у сфері випробувань зразків озброєння застосування результатів вимірювань, отриманих в акредитованих лабораторіях, дозволяє забезпечити простежуваність передавання фізичних величин відповідно до національних чи міжнародних еталонів. Це сприяє достовірності результатів під час оцінювання характеристик безпілотних систем та водночас створює передумови для усунення технічних бар'єрів у співпраці з європейськими виробниками озброєння.

Ключові слова: система озброєння; безпілотна система; випробування озброєння; міжнародна співпраця; статистичний метод оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Стрімкий розвиток сучасних зразків військової техніки сприяє формуванню нових підходів до ведення бойових дій та активному впровадженню в практику застосування різноманітних дистанційно керованих систем, які виконують широкий спектр завдань і дедалі частіше використовуються під час проведення військових операцій. Водночас ефективність їх застосування значною мірою залежить від наявності чітко визначених тактико-технічних характеристик, що враховують під час планування бойових операцій, тому особливого значення набуває достовірність отриманих даних та можливість їх оцінювання в різних умовах експлуатації. Саме тому дослідження технічних параметрів безпілотних систем (БПС) у процесі випробувань є важливим етапом, який передуює їх прийняттю на озброєння. Інформація про граничні можливості зразка озброєння та його технічні характеристики в різних умовах застосування дає змогу забезпечити найбільш раціональне та ефективне використання техніки під час виконання бойових завдань. Саме тому особливо актуальним є застосування еталонної бази, здатної забезпечувати передавання фізичних одиниць із необхідним рівнем точності та достовірності (метрологічно справної) і методи перевіряння цього рівня точності в ході використання еталонів під час проведення випробувань. Про важливість цього питання наголошено в спільному документі Міжнародної кооперації з акредитації лабораторій (ILAC) та Міжнародної організації законодавчої метрології (OIML), який прийнято як національний стандарт ДСТУ ILAC-G24/OIML D 10. У ньому зазначено, що однією з ключових умов забезпечення простежуваності та надійності результатів вимірювань є встановлення максимально допустимого інтервалу часу між двома послідовними калібруваннями засобів вимірювальної техніки. Крім того, стандарт вказує на те, що використання так званої інженерної інтуїції для визначення міжкалібрувальних інтервалів не може вважатися достатньо обґрунтованим підходом. Так само недостатньо надійною вважається система застосування фіксованих інтервалів калібрування без їх подальшого перегляду. У зв'язку із цим випробувальні та калібрувальні лабораторії повинні розробляти відповідні критерії, які дозволяють коригувати міжкалібрувальні інтервали з урахуванням умов експлуатації

засобів вимірювальної техніки або надавати документальне обґрунтування їх незмінності. Реалізація такого підходу потребує впровадження спеціальних алгоритмів і процедур, що дають змогу оцінювати ступінь наближення показань еталонних засобів до меж допустимих відхилень та своєчасно визначати необхідність проведення їх повторного калібрування. Саме методам проміжного перевіряння еталонної бази під час проведення випробувань БпС і прогнозуванню їх метрологічної справності присвячено цю статтю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання випробування зразків озброєння є широко обговорюваним у колах науковців та практиків – випробувачів військової техніки. Так, в [1] розкрито передумови розвитку безпілотних технологій як важливого елемента забезпечення сучасних військових операцій, проаналізовано законодавче та нормативне підґрунтя процедури приймання безпілотних комплексів на озброєння.

У роботі [2] за результатами проведеного аналізу чинних нормативних документів зроблено висновки про деякі стандарти НАТО та зміни їх статусу в Україні з національного на військовий із введенням обов'язковості їх застосування на підприємствах, в установах та організаціях усіх форм власності, що виконують роботи для потреб оборони. Також виділено групи військових стандартів, що прямо чи опосередковано регламентують вимоги до забезпечення єдності та простежуваності вимірювань у ході випробувань зразків озброєння та військової техніки. Окреслено труднощі в запровадженні стандартів НАТО в нашій державі та шляхи вирішення проблемних питань.

У статті [3] розглянуто деякі питання впровадження та застосування міжнародних нормативних і нормативно-технічних документів, зокрема стандартів НАТО, під час проведення випробувань зразків озброєння. Вказано на певні нюанси щодо співробітництва України з міжнародними партнерами у сфері стандартизації, з-поміж яких варто виокремити відмінності організаційних структур систем стандартизації та фондів стандартів.

Публікація [4] присвячена особливостям випробувань відповідно до стандартів НАТО з гарантування якості (STANAG4107) та вимогам до алгоритмів, методів і порядку проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки за різними видами та напрямками. Однак у цій роботі не проаналізовано в достатньому обсязі особливостей впровадження стандартів НАТО в приймальних випробуваннях.

У [5] описано підхід до визначення міжкالیбрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), який ґрунтується на рекомендаціях розділу А.5 стандарту ДСТУ-Н РМГ 74:2009 [6]. У межах цього підходу інтервали Т1 (віяловий) і Т2 (лінійний) трактуються як випадкові процеси, що відображають розподіл дрейфу невизначеності вимірювань відносно нульового значення, їх обчислюють за відповідними формулами. Водночас зазначений метод є досить складним для практичного застосування, оскільки потребує повної інформації про показники надійності ЗВТ, зокрема ймовірність безвідмовної роботи та прогнозований річний ресурс елементів. На практиці зазвичай цих даних немає. Крім того, навіть за їх наявності застосування підходу обмежується низкою припущень, що можуть істотно впливати на достовірність отриманих результатів.

У дослідженні [7] запропоновано альтернативний підхід до коригування міжкалібрувальних інтервалів для наборів плоскопаралельних кінцевих мір довжини, який поєднує елементи методів автоматичного регулювання та контрольних діаграм, наведених у [8]. Вихідними даними слугують результати трьох послідовних калібрувань із періодичністю 12 місяців. На їх основі оцінюють середнє відхилення вимірюваної величини від номінального значення, після чого обчислюють середньоквадратичне відхилення результатів. Далі визначають імовірне відхилення значення, яке відтворює міра (X_p), від номіналу. Рішення щодо зміни міжкалібрувального інтервалу приймається шляхом порівняння отриманого X_p із максимально допустимою похибкою ЗВТ, встановленою виробником або нормативними документами відповідно до вимог методик калібрування чи випробувань. Але цей підхід має певні обмеження, адже в діяльності калібрувальних і випробувальних лабораторій основною характеристикою результатів є невизначеність вимірювань, а не похибка. Тому пряме зіставлення X_p із гранично допустимою похибкою не завжди є коректним. З огляду на це доцільно застосовувати альтернативний підхід, відповідно до якого результати розрахунків порівнюють не лише з допустимими межами похибки, а й із цільовою невизначеністю, встановленою для конкретної лабораторії. Це дає змогу підвищити достовірність результатів метрологічних досліджень. Водночас значення цільової невизначеності має обчислюватися з урахуванням допустимих похибок ЗВТ.

У розробці [9] описано метод прогнозування метрологічної справності ЗВТ на основі обмеженої кількості експериментальних даних. Він дозволяє оцінити кількість вимірювань, яку прилад може виконати до виходу похибки за встановлені межі. Це, у свою чергу, дає можливість визначити фактичний ресурс роботи засобу без додаткового юстування та сприяє підвищенню якості продукції за рахунок зменшення кількості браку. Оброблення результатів вимірювань згідно з цим підходом здійснюється із застосуванням методів експоненційного згладжування, зокрема шляхом розрахунку експоненційних середніх значень.

У статті [10] розглянуто питання щодо впровадження способів перевірки якості методів випробування зразків озброєння, зокрема їх стійкість до зміни вхідних умов, а також створення однозначних математичних моделей, які дозволять оцінити показники якості таких методів. Ці моделі запропоновано будувати з використанням статистичних методів, що дозволяють аналізувати випадкові величини та робити висновки щодо їх кореляції.

Формулювання завдання дослідження. На підставі проаналізованих публікацій та порушених у них проблем можна зробити висновок, що система технічного регулювання в оборонній сфері, зокрема щодо випробування БпС озброєння, знаходиться на етапі становлення та переходу на міжнародні стандарти. Отже, на сьогоднішній день питання розроблення та впровадження методів контролювання метрологічної справності еталонної бази є актуальним. Вимогами до цих методів є аналізування стану еталонної бази за обмеженої можливості проведення міжлабораторних перевірянь еталонів із лабораторіями-провайдерами.

Виклад основного матеріалу. Дослідження присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі з перевіряння метрологічної справності вимірювального устаткування, що використовується для випробування зразків БпС та їх складових, і оцінювання його стабільності протягом міжкалібрувального проміжку часу.

Упровадження в роботу випробувальної лабораторії розроблених документів, які регламентують порядок її роботи, а саме систему управління якістю, є одним із дієвих способів показати, що отримані дані досліджень є достовірними, а тому на них можна покластися для прийняття рішень щодо відповідності зразків озброєння встановленим вимогам. З іншого боку, стандартизація процесів лабораторного аналізу гарантує достатню точність його результатів, а можливі помилки в них зведені до мінімуму.

Отже, одним із показників правильності роботи лабораторії є надання нею документальних доказів відповідності результатів випробування вимогам точності та достовірності.

У практиці як випробувальних, так і калібрувальних лабораторій є процедура верифікації [10], яка передбачає зміну одного з вхідних параметрів в методі випробування й оцінювання кореляції результатів випробувань одного і того ж дослідного зразка. Метою верифікації є підтвердження стабільності результатів випробувань у разі зміни вхідних параметрів випробувань.

Але такий аналіз можна застосувати і для проміжного перевіряння еталонної бази. Річ у тім, що за недостатньої кількості даних про можливі відхилення результатів вимірювань, які можуть бути викликані еталоном, і відсутності можливості проконтролювати точність робочого еталону в умовах лабораторії, постає питання в процедурі підтвердження того, що еталонний засіб зберігає його метрологічну справність.

Водночас часто виникає питання, яким чином підтвердити достовірність показань робочого еталона коли відсутня можливість порівняння його результатів з результатами аналогічного взірця або вихідного еталона, який передає таку саму фізичну величину.

У такому разі може бути корисним застосування методу статистичного оцінювання результатів досліджень. Суть його полягає в порівнянні результатів вимірювань у ході проведення випробувань одного і того ж самого зразка в однакових умовах, але з використанням різних робочих еталонів. При цьому обраховується невизначеність результатів вимірювань з відповідними бюджетами невизначеності, де зазначаються дані калібрування кожного еталона. Цей метод схожий з тим, який використовують під час проведення міжлабораторних перевірянь, але тоді в лабораторії провайдера наявне референсне значення величини з доведеними метрологічними параметрами. У результаті ж проведення перевіряння міжвипробувальними лабораторіями, які не є провайдерами, виникає завдання оцінити збереження точності самих еталонів за відсутності референсних зразків. У такому разі доцільним є оцінювати не самі результати випробувань, а величину їх кореляції між учасниками. Питання полягає в тому, що еталонні засоби вимірювань (еталонні міри) мають як похибку вимірювання чи відтворення, так і певний дрейф метрологічних характеристик, спричинений їх конструктивними особливостями. Зокрема, цей процес значно проявляється в мірах, що є хімічними сполуками, розчинами чи

чистими речовинами – так звані CRM. Відповідно, доцільно використовувати для перевіряння цих еталонних мір метод паралельних вимірювань із застосуванням еталонної бази різних лабораторій та визначенням ступеня кореляції між масивами вимірювань. Суть такого підходу полягає в тому, що однакові міри мають давати практично однакові результати. Саме тут і виникає задача оцінювання тісноти взаємозв'язку результатів випробувань: чи зміняться вони в разі дії інших вхідних параметрів експерименту, тобто за застосування іншого еталона для вимірювань.

Для оцінювання інтенсивності взаємозв'язку використовують коефіцієнт кореляції, абсолютне значення якого знаходиться в межах від -1 до 1. Він дає кількісну оцінку статистичного взаємозв'язку між результатами вимірювань та показує, яка частка варіативності залежної змінної пояснюється регресійною моделлю. Тобто цей показник у застосуванні до випробувань можна інтерпретувати ступенем впливу точності еталона на їх результати, зокрема в експерименті, коли випробування проводяться в первинних нормалізованих початкових умовах або в разі зміни еталонного устаткування під час проведення випробувань.

Розглянемо процедуру методу проміжного перевіряння еталонів. Для зовнішньолабораторного перевіряння необхідно дві лабораторії зі схожими сферами акредитації за видами випробувань, які мають однотипні еталони, одна з них (провайдер) обирає зразок озброєння для випробування, до неї доставляються еталони іншої лабораторії (учасника-опонента). При цьому дотримуються таких умов:

вибираються учасники для проведення перевіряння;

визначають зразок озброєння БпС для випробування з метою проведення проміжного перевіряння еталонів;

еталони для перевіряння доставляються одному з учасників;

учасником-провайдером стабілізуються умови проведення випробування та зберігання еталонів відповідно до їх технічної документації, вони заносяться в протокол.

Лабораторія-провайдер виконує випробування одного й того ж самого дослідного зразка одним оператором в однакових умовах із використанням різних еталонів (провайдера й учасника-опонента), проводиться статистичний обрахунок за допомогою математичного апарату, що описано нижче.

Розглянемо процедуру перевіряння. Запропонований тест забезпечує спосіб визначення того, чи призведе зміна еталонної бази під час випробувань до зміни їх результатів. Для цього проводять два послідовні випробування одного й того самого зразка БпС. При цьому щоразу всі вхідні параметри експерименту зберігаються без змін, окрім еталонної міри (еталонного засобу вимірювальної техніки), що застосовується під час вимірювань і буде змінюватися в ході перевірянь.

Для оцінювання результатів випробування може бути застосовано математичний апарат обрахунку параметричної кореляції (коефіцієнт кореляції Пірсона), є такі передумови застосування цього методу: усі спостереження взаємно незалежні та мають нормальний закон розподілу.

Опис методу. Значення коефіцієнта кореляції розраховуємо за такою формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

де X_i – i -те значення результату випробувань під час першого експерименту (нормалізовані умови);

\bar{X} – середнє арифметичне значення результатів випробувань у ході першого експерименту (нормалізовані умови);

Y_i – i -те значення результату випробувань за час проведення другого експерименту (умови зі зміною параметра, вплив якого на результати випробувань досліджується за цим тестом);

\bar{Y} – середнє арифметичне значення результату випробувань під час проведення другого експерименту (умови зі зміною параметра, вплив якого на результати випробувань досліджується за цим тестом);

N – кількість спостережень.

Обрахований результат знаходиться в межах $r = \pm 1$,

де $r = +1$ означає прямо пропорційну кореляційну залежність (рис. 1);

$r = -1$ – обернено пропорційну кореляційну залежність (рис. 2);

$r^2 = 0$ свідчить про 0% збігу, тобто нульову кореляційну залежність (рис. 3).

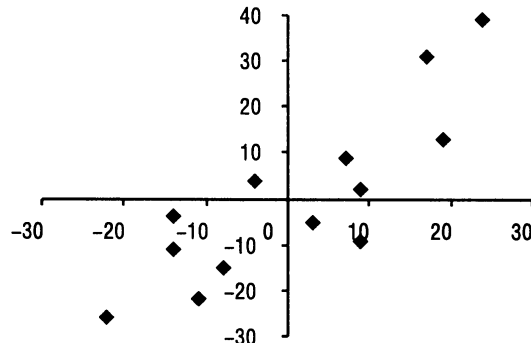


Рис. 1. Приклад прямо пропорційної кореляційної залежності

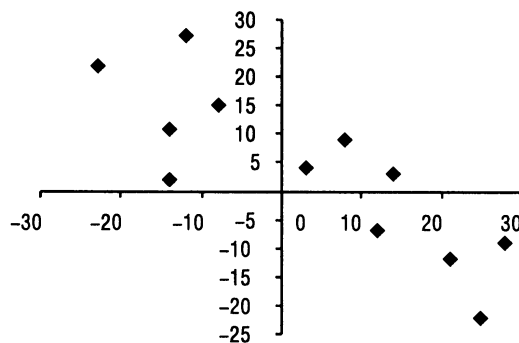


Рис. 2. Приклад обернено пропорційної кореляційної залежності

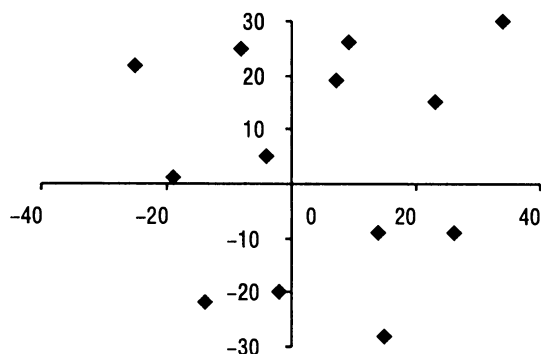


Рис. 3. Приклад нульової кореляційної залежності

Оскільки проводиться обрахунок випадкової величини, то для достовірності результату перевіряння необхідно оцінити статистичну значущість отриманого коефіцієнта кореляції, тобто визначити, наскільки суттєво він відмінний від нуля. Це можна зробити за допомогою критерію Стюдента. Для цього критерій значущості $t_{\text{розр}}$ обчислюємо за такою формулою:

$$t_{\text{розр}} = \frac{r_{xy} \sqrt{(N-2)}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)}}, \quad (2)$$

де r_{xy} – розрахований коефіцієнт кореляції;

N – кількість спостережень.

Якщо $t_{\text{розр}}$ більше або дорівнює табличному значенню коефіцієнта Стюдента, взятого з $N = 2$ ступенями свободи, то нульова гіпотеза відкидається. Це означає, що коефіцієнт кореляції значно відрізняється від нуля (із вибраним рівнем значущості) і кореляція між результатами вимірювань є підтвердженою. Тобто знайдений зв'язок є статистично значущим (не випадковим) та підтверджує припущення методу про наявність кореляції між масивами результатів вимірювань, а відтак, і достовірність вимірювань обома еталонами, що свідчить про їх метрологічну справність.

У разі ж непідтвердження кореляції або наявної обернено пропорційної кореляційної залежності, це може свідчити про дрейф чи зміну крутизни характеристики одного з еталонів. Відповідно, необхідно провести додатковий раунд уже із залученням третього зразка еталонної бази і послідовно перевірити з ним перший та другий зразки із подальшими обрахунками. Тоді за значеннями коефіцієнта кореляції можемо оцінити, який з еталонів виходить за межі метрологічних характеристик або має відхилення від них.

Отже, послідовно проводячи серії випробувань у ході перевіряння еталонів, а саме змінюючи еталони провайдера чи опонента й обраховуючи ступінь кореляції, можна дослідити вплив точності та стабільності еталона на результат випробувань, а також визначити стабільність еталонної міри, яка відтворює певну фізичну величину. Відповідно, якщо один і той самий зразок озброєння дає корельовані результати під час випробування двома мірами, а нормовані похибки мір є однаковими (з урахуванням точності ЗВТ та випадкових похибок), то міри опонента та провайдера можна вважати стабільними в періоді міжкалібрувального інтервалу.

Для внутрішньолабораторного перевіряння, що може бути проведено в умовах лабораторії згідно з графіком проміжного перевіряння еталонів, використовуємо такий алгоритм:

вибираємо дослідний зразок БпС для випробувань і проміжного перевіряння еталонів; вибираємо еталони з наявних у лабораторіях-учасниках та відкаліброваних в установленому порядку, які відтворюють або вимірюють однакову фізичну величину в зіставлених діапазонах (наприклад, комплект світлофільтрів для відтворення коефіцієнта спрямованого оптичного пропускання та набір його мір, виготовлених на основі перхлорату хрому та біхромату калію, або ж інші набори різних виробників, гирі чи динамометри з однаковими діапазонами тощо).

Для обраних еталонів стабілізуються умови проведення випробувань і зберігання еталонної бази відповідно до технічної документації. Один оператор лабораторії виконує два паралельні випробування одного й того самого зразка БпС в ідентичних умовах різними еталонами. Далі проводиться статистичний обрахунок за допомогою запропонованого методу.

Доцільно також проводити оцінювання прогнозованого часу збереження метрологічної справності. За відсутності даних щодо значень первинних технічних характеристик виробника в розрізі заявлених похибок та невизначеностей приладів, а також їх міжкалібрувальних інтервалів, використовуються статистичні методи оброблення результатів вимірювань для доказу того, що обрана лабораторією тривалість експлуатації еталона без його перекалібрування не впливає на правильність результату. При цьому вважається, що похибки вимірювань можна розділити на дві групи: обумовлені випадковими (прецизійність) та систематичними (правильність) причинами.

Зазначені поняття описують якість проведення робіт у певних умовах лабораторії. Модифікувавши запропонований алгоритм, можна його застосувати для оцінювання якості функціонування самого обладнання, зокрема його метрологічних характеристик, тобто правильності еталонної бази (рис. 4).

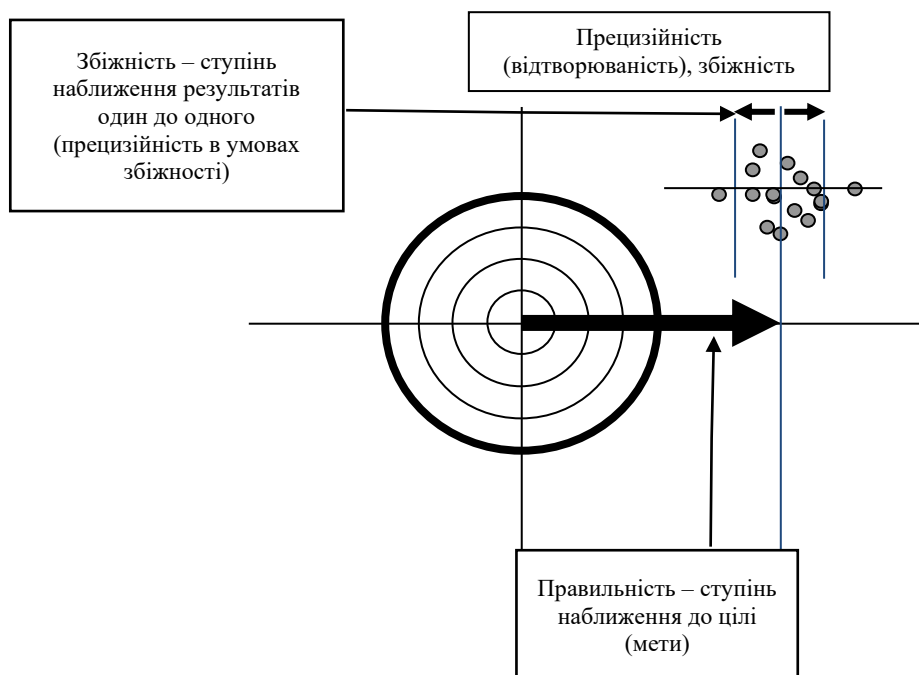


Рис. 4. Графічне зображення понять збіжності та правильності результатів вимірювання

Статистичні методи оброблення результатів є гнучкими щодо можливості оцінювання конкретного процесу дослідження, їх застосування дозволяє провести аналіз якості результатів вимірювань під час проведення випробувань навіть за умови обмеженої можливості використання еталонної бази чи з невеликим масивом вхідних даних.

Методологія оцінювання міжкалібрувальних інтервалів передбачає що згідно з методом оцінювання кореляції, описаним вище, проводяться внутрішньолабораторні проміжні перевіряння, результати яких задокументовані та обраховані. Ці дані є вхідними параметрами для прогнозу моделі, що буде лінію тренду для розвитку значень коефіцієнта кореляції, які були отримані в ході проміжного перевіряння.

Тривалість міжкалібрувального інтервалу може бути оцінена шляхом прогнозування коефіцієнта кореляції на визначену кількість часових інтервалів проміжних перевірянь, протягом яких спрогнозоване значення коефіцієнта кореляції знаходитиметься в межах допуску згідно з математичним апаратом перевіряння еталонів, описаним вище.

Математичний апарат та методика застосування запропонованого методу.

Для опису часових рядів у ході прогнозування використовують математичні моделі.

Часовий ряд x_t , отриманий за результатами вимірювань, можна подати у вигляді суми компонентів:

$$x_t = \xi_t + \varepsilon_t, \quad (3)$$

де величина ε_t утворена випадковим неавтокорельованим процесом з нульовим математичним сподіванням і кінцевою (необов'язково постійною) дисперсією (шуми вимірювань), а величину ξ_t можна отримати випадковим процесом вимірювання (випадкова похибка). Ці величини різняться характером впливу на значення результатів. Змінна ε_t впливає тільки на значення поточного результату, а величина ξ_t певною мірою на значення декількох або всіх наступних результатів вимірювання.

Найпростіша адаптивна модель ґрунтується на обчисленні так званої експонентної середньої. Припустимо, що досліджується ряд результатів вимірювань. Виявлення й аналіз тенденції динамічного ряду результатів замірів часто проводиться за допомогою його вирівнювання або згладжування. Експонентне згладжування – один із найпростіших розповсюджених прийомів вирівнювання ряду даних, в основі якого лежать розрахунки експонентних середніх.

Експонентне згладжування здійснюється за рекурентною формулою:

$$S_t = \alpha x_t + \beta S_{t-1} \quad (4)$$

де S_t – значення експонентної середньої в момент t ;

α – параметр згладжування, $\alpha - \text{const}$, $0 < \alpha < 1$;

$\beta = 1 - \alpha$.

Вираз (3) можна подати в такий спосіб:

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)S_{t-1} = S_{t-1} + \alpha(x_t - S_{t-1}). \quad (5)$$

Експонентна середня на момент t тут виражена як експонентна середня попереднього моменту плюс частка різниці поточного спостереження й експонентної середньої минулого моменту.

Якщо послідовно використовувати рекурентне співвідношення (4), то експонентну середню S_t можна виразити через значення часового ряду x :

$$\begin{aligned} S_t &= \alpha x_t + \beta S_{t-1} = \alpha x_t + \alpha \beta x_{t-1} + \beta^2 S_{t-2} = \dots = \\ &= \alpha x_t + \alpha \beta x_{t-1} + \beta^2 S_{t-2} + \dots + \alpha \beta^l x_{t-l} + \beta^N S_0 = \alpha \sum_{i=0}^{N-l} \beta^l x_{t-i} + \beta^N S_0, \end{aligned} \quad (6)$$

де N – кількість членів ряду;

S_0 – деяка величина, що характеризує початкові умови для першого застосування формули (2), якщо $t = 1$.

Отже,

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{N-l} \beta^l x_{t-i} + \beta^N S_0, \quad (7)$$

Як бачимо, величина S_t оцінюється як зважена сума всіх членів ряду результатів вимірювань, причому вага внеску кожного результату падає експоненційно залежно від давнини (віку) спостереження конкретного результату. Це й пояснює, чому S_t названо експонентною середньою. Якщо, наприклад, $\alpha = 0,3$, то поточне спостереження буде мати вагу 0,3, а ваги попередніх даних становитимуть відповідно 0,21; 0,147; 0,1029 і т. д.

Таким чином, застосовуючи методи прогнозування і знаючи дані оцінювання коефіцієнтів кореляції в ході перевіряння еталонів, можна спрогнозувати ту кількість циклів процедури, яку може забезпечити еталон до виходу коефіцієнта кореляції за встановлені межі статистичної значущості без перекалібрування.

Отже, застосування методу статистичного оброблення результатів вимірювань дозволить попередньо прогнозувати поведінку окремого, конкретно взятого еталона в часі за отриманими даними, що дасть змогу оцінити інтервал, протягом якого зберігається його робота із заданою точністю без повторного калібрування та юстування.

Висновки. У статті запропоновано один із методів оцінювання придатності еталонної бази під час проведення випробування зразків БпС, який відрізняється простотою та універсальністю щодо використання в умовах лабораторії. Об'єктивність критеріїв оцінювання метрологічної справності та їх однозначність дозволяють надавати чіткі твердження щодо придатності чи непридатності еталонної бази окремо взятої лабораторії. Запропонований алгоритм також надає можливість проводити перевіряння засобів вимірювальної техніки без залучення лабораторій провайдерів, що є економічно ефективним, оскільки не вимагає додатково очікувати проведення ними раундів звіряння. Науковою новизною цього методу оброблення результатів є можливість виявити наявність дрейфу еталона або зміну крутизни його характеристики, оскільки критерій

коефіцієнта кореляції є чутливим до таких відхилень. Крім того, застосування наведеної методики дозволяє одночасно планово контролювати компетентність лабораторій – учасників проміжного перевіряння.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Випробування безпілотних авіаційних комплексів у бойових умовах / О. М. Походенко, Р. В. Місценко, Ю. В. Жежерун та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2024. № 4 (22). С. 106–114. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.13>
2. Деякі особливості застосування стандартів НАТО щодо забезпечення єдності вимірювань при випробуваннях виробів озброєння та військової техніки / В. В. Борщ, О. І. Вервейко, М. І. Світенко, А. О. Семироз // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2023. № 1 (15). С. 26–33. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.04>
3. Проблемні питання нормативно-технічного забезпечення проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки / І. М. Лаппо, Ю. М. Добришкін, М. О. Геращенко та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2019. Вип. 2 (2). С. 112–118. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15>
4. Деякі особливості метрологічного забезпечення випробувань озброєння та військової техніки відповідно до стандартів НАТО та провідних країн світу / В. В. Борщ, П. Л. Аркушенко, О. І. Вервейко та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2019. Вип. 2 (2). С. 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.05>
5. Розрахунок міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки / О. Ф. Волков, Р. О. Волков, К. С. Колобов та ін. // Автомобільний транспорт. 2015. № 5 (247). С. 11–13.
6. ДСТУ-Н РМГ 74:2009 Метрологія. Методи визначання міжповіркового та міжкалібрувального інтервалів засобів вимірювання (РМГ 74-2004, IDT). Національний стандарт України. [Чинний від 2010-04-01]. 27 с.
7. Косарева О., Дзябенко О. Коригування міжкалібрувальних інтервалів вимірювального обладнання // Метрологія та прилади. 2017. № 3. С. 33–35.
8. ДСТУ ІЛАС-G24/OIML D 10:2013. Метрологія. Настанови щодо визначення міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки (ІЛАС-G 24/OIML D 10:2007, IDT). Національний стандарт України. [Чинний від 2014-07-01]. 30 с.
9. Кучерук В., Омельчук І. Прогнозування часу збереження метрологічної справності та оцінювання міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ // Метрологія та прилади. 2017. № 5-І (67). С. 78–81.
10. Використання статистичних методів для оцінювання результатів випробування безпілотних систем / І. А. Омельчук, А. М. Токар, В. Л. Рикун, І. В. Свистунович // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних

інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир, ЖВІ, 2026. Вип. 29. С. 164–175.
<https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.12>

Стаття надійшла до редакції 01.04.2026.

Прийнято до друку 28.04.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Pokhodenko, O. M., Mistsenko, R. V., & Zhezherun, Yu. V., et al. (2024). Vyprobuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u boiovykh umovakh [Testing of Unmanned Aviation Complexes in Combat Conditions]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 4 (22), 106–114. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.13> [in Ukrainian].
2. Borshch, V. V., Verveiko, O. I., Svitenko, M. I., & Semyroz, A. O. (2023). Deiaki osoblyvosti zastosuvannia standartiv NATO shchodo zabezpechennia yednosti vymiriuvan pry vyprobuvanniakh vyrobiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Some Features of the Application of NATO Standards Regarding Ensuring the Uniformity of Measurements During Testing of Armament and Military Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 1 (15), 26–33. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.04> [in Ukrainian].
3. Lappo, I. M., Dobryshkin, Yu. M., & Herashchenko, M. O., et al. (2019). Problemni pytannia normatyvno-tekhnichnoho zabezpechennia provedennia vyprobuvan zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Problematic Issues of Regulatory and Technical Support for Testing Samples of Weapons and Military Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (2), 112–118. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15> [in Ukrainian].
4. Borshch, V. V., Arkushenko, P. L., & Verveiko, O. I., et al. (2019). Deiaki osoblyvosti metrolohichnoho zabezpechennia vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky vidpovidno do standartiv NATO ta providnykh krain svitu [Some Features of Metrological Support for Testing Weapons and Military Equipment in Accordance with NATO Standards and Leading Countries of the World]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (2), 33–40. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.05> [in Ukrainian].
5. Volkov, O. F., Volkov, R. O., & Kolobov, K. S., et al. (2015). Rozrakhunok mizhkalibruvalnykh intervaliv zasobiv vymiriualnoi tekhniky [Calculation of Intercalibration Intervals of Measuring Instruments]. *Avtomobilnyi transport [Automobile Transport]*, 5 (247), 11–13. [in Ukrainian].
6. DSTU-N RMH 74:2009. *Metrolohiia. Metody vyznachannia mizhpovirkovoho ta*

mizhkalibruvalnoho intervaliv zasobiv vymiriuvannia [Metrology. Methods for Determining the Intercalibration and Intercalibration Intervals of Measuring Instruments] (RMH 74-2004, IDT). Natsionalnyi standart Ukrainy [National Standard of Ukraine]. (2010). [in Ukrainian].

7. Kosarieva, O., & Dziabenko, O. (2017). Koryhuvannia mizhkalibruvalnykh intervaliv vymiriuvannia [Correction of Intercalibration Intervals of Measuring Equipment]. *Metrolohiia ta prylady [Metrology and Instruments]*, 3, 33–35 [in Ukrainian].

8. DSTU ILAC-G24/OIML D 10:2013. Metrolohiia. Nastanovy shchodo vyznachennia mizhkalibruvalnykh intervaliv zasobiv vymiriuvannia tekhniki [Metrology. Guidelines for Determining the Intercalibration Intervals of Measuring Instruments] (ILAC-G 24/OIML D 10:2007, IDT). Natsionalnyi standart Ukrainy [National Standard of Ukraine]. (2014). [in Ukrainian].

9. Kucheruk, V., & Omelchuk, I. (2017). Prohnozuvannia chasu zberezhennia metrolohichnoi spravnosti ta otsiniuvannia mizhkalibruvalnykh intervaliv ZVT [Forecasting the Time of Preservation of Metrological Serviceability and Evaluation of Intercalibration Intervals of Measuring Instruments]. *Metrolohiia ta prylady [Metrology and Instruments]*, 5-I (67), 78–81 [in Ukrainian].

10. Omelchuk, I. A., Tokar, A. M., Rykun, V. L., & Svystunovych, I. V. (2025). Vykorystannia statystychnykh metodiv dlia otsiniuvannia rezultativ vyprobuvannia bezpilotnykh system [Use of Statistical Methods for Evaluating the Results of Testing Unmanned Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29, 164–175. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.12> [in Ukrainian].

I. A. Omelchuk, I. A. Pilkevych, Yu. O. Podchashynskyi, V. I. Zghuria

THE METHOD OF VERIFYING THE STANDARDS TO PRESERVE THE RELIABILITY OF THE RESULTS OF THE TESTING OF UNMANNED SYSTEMS

Ukraine's long-term armed struggle against the aggressor, as well as the accumulated international experience of using unmanned systems in modern military conflicts, became an important factor that led to the creation of a separate type of forces within the Armed Forces of Ukraine.

In modern conditions, the importance of unmanned systems in the structure of weapons is constantly growing. This, in turn, creates a need to increase the volume of design, research of prototype samples and serial production of the latest unmanned complexes for various purposes. The functioning of such systems is based on complex technological processes and includes a significant number of interconnected elements, nodes and subsystems. In addition, each sample of unmanned vehicles is characterized by a large set of parameters and technical indicators. In this regard, there is a need to conduct comprehensive research to confirm the validity of technical decisions made in new developments, as well as for the effective implementation of existing scientific developments in the process of creating and manufacturing unmanned systems.

Since it is the test results that are the key source of information for assessing the compliance of products with established requirements, the reliability of the obtained data during their

implementation is of particular importance. The reliability of the results largely depends on the correctness of the applied research methods and the level of competence of the laboratories that conduct the relevant measurements. At the current stage, one of the generally recognized mechanisms for confirming the quality and reliability of test results is the accreditation of laboratories in accordance with the requirements of the international standard ISO / IEC 17025:2019. This standard establishes criteria for evaluating the competence of testing and calibration laboratories, in particular, in terms of ensuring the accuracy of measurements and the state of their reference base. Each test is carried out using measuring equipment – standards that allow measuring or reproducing the corresponding physical values that characterize the parameters of the tested weapons samples. Accordingly, each of these measuring devices must have sufficient accuracy for the objectivity of the tests. In the context of the implementation of NATO standards in the field of testing weapons samples, the use of measurement results obtained in accredited laboratories allows to ensure the traceability of the transfer of physical values to national or international standards. This contributes to the reliability of the results when evaluating the characteristics of unmanned systems and at the same time creates the prerequisites for removing technical barriers in cooperation with European arms manufacturers.

Keywords: *weapon system; unmanned system; weapons testing; international cooperation; statistical method, evaluation.*

П. В. Опенько, канд. техн. наук, ст. досл.

Інститут авіації та протиповітряної оборони Національного університету оборони України

<https://orcid.org/0000-0001-7777-5101>

О. М. Доска, канд. техн. наук, доц.

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

<https://orcid.org/0000-0002-9874-8716>

О. М. Сампір, Ph. D.

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-3564-1997>

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПЛАНУ ДОСТАВЛЯННЯ ВІЙСЬКОВИХ ВАНТАЖІВ НА ЛІНІЇ БОЙОВОГО ЗІТКНЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Досвід війни за Незалежність України свідчить про те, що, починаючи з 2023 року, відбувається її технологічна трансформація. Безпілотні літальні апарати стали головним інструментом розвідки та ураження. Поле бою перетворилося на відкритий простір для спостереження: будь-яке зосередження техніки негайно фіксується та знищується. Через розвиток безпілотних літальних апаратів «сіра зона» (територія, яку не контролює жодна сторона) розширилася. Раніше вона могла бути кількасот метрів, проте зараз через постійний моніторинг з повітря вона може сягати до п'яти кілометрів, де будь-яка присутність людини чи техніки моментально викликає вогонь на ураження.

У таких умовах логістичне забезпечення підрозділів із використанням штатних транспортних засобів є майже неможливим, тому застосування безпілотних літальних апаратів та наземних роботизованих комплексів для логістики перетворилося з експерименту на життєву необхідність, особливо для підрозділів на лінії бойового зіткнення, де звичайний транспорт знищується за лічені хвилини.

Доставляння військових вантажів (матеріально-технічних засобів) за допомогою безпілотних літальних апаратів на лінію бойового зіткнення пов'язане з низкою проблем, а саме: застосуванням противником засобів радіоелектронної боротьби, малою вантажопідйомністю цього виду техніки, залежністю її функціонування від погодних умов тощо. Усе це значно ускладнює процес управління логістичним забезпеченням і потребує більш обґрунтованих рішень для визначення стратегії та планів доставляння військових вантажів підрозділам із використанням безпілотних літальних апаратів.

У статті проведено формалізацію задачі визначення оптимального плану доставляння матеріально-технічних засобів на лінії бойового зіткнення з використанням безпілотних літальних апаратів та розглянуто методичний підхід до її розв'язання.

© П. В. Опенько, О. М. Доска, О. М. Сампір, 2026

Ключові слова: логістичне забезпечення; безпілотний літальний апарат; боєприпас; дріб; лінія бойового зіткнення; військовий вантаж; план перевезень.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні бойові дії характеризуються високою динамікою, насиченістю засобами ураження та необхідністю оперативного забезпечення підрозділів. Традиційні методи доставляння військових вантажів (автомобільний транспорт, бронетехніка) часто стають вразливими через артилерійські удари, мінно-вибухові загородження та постійний моніторинг противника. У цьому контексті використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [1–3] як транспортних платформ відкриває нові можливості для підвищення ефективності та безпеки логістики, адаптує її до умов високотехнологічної війни [4].

Можливими областями застосування БпЛА є доставляння необхідних вантажів підрозділам, дислокованим у віддалених і важкодоступних районах, групам, які проводять спеціальні операції, та рейдовим групам, що виконують бойові завдання у відриві від джерел постачання тощо [5].

Для здійснення доставляння матеріально-технічних засобів (МТЗ) широко використовують БпЛА типу R18 або Vampire вантажопідйомністю до 15 кг. При цьому посилки комплектують таким чином, щоб їх вага була не більше 10 кг, інакше дрон не витримує навантаження або починається його розхитування [6]. Крім того, для вирішення завдань логістичного забезпечення широкого застосування набули квадрокоптери типу DJI Matrice 300/350 RTK, легкі дрони типу DJI Mavic 3, одноразові БпЛА Suraq Corvo PPDS та інші [7, 8].

До основних МТЗ, що замовляють підрозділи, належать [4]: боєприпаси, вода, продукти харчування, ліки, речове майно на заміну, резервні джерела живлення для тепловізорів, радіостанцій, засоби особистої гігієни тощо.

Особливостями доставляння таких вантажів є те, що значний їх відсоток може бути втрачено або пошкоджено на етапі скидання на позиції, тому їх підготовка та пакування потребують певних матеріальних та часових витрат [4].

Забезпечення підрозділів МТЗ ускладнюється низкою об'єктивних чинників, з-поміж яких: обмежена вантажопідйомність БпЛА, їхня підвищена чутливість до засобів радіоелектронної протидії та залежність від метеорологічних умов. Сукупність зазначених факторів зумовлює необхідність збільшення кількості рейсів, що істотно підвищує ймовірність недоотримання вантажів, демаскування позицій підрозділів та їх подальшого ураження противником. У цьому контексті пріоритетним завданням стає організація доставляння військових вантажів у максимально стислі терміни з використанням мінімальної кількості рейсів, що є критично важливим для збереження боєдатності та оперативної стійкості військових формувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання постачання військових вантажів підрозділам у бойових умовах є окремим і надзвичайно важливим напрямом досліджень у військовій логістиці, якому присвячена значна кількість наукових праць.

Так, у статті [4] досліджено сучасні підходи до оптимізації процесів логістичного забезпечення військових підрозділів в умовах активних бойових дій. Проаналізовано основні

виклики, з-поміж яких: складність постачань, ризик втрат через обстріли та порушення інфраструктури, а також обмежені можливості використання традиційних методів логістики.

У роботі [5] проведено аналіз досвіду використання безпілотних технологій у сфері вантажних перевезень та евакуації персоналу. Визначено переваги БПЛА порівняно зі штатними транспортними засобами. Розглянуто перспективні сфери застосування безпілотних технологій, направлених на підвищення ефективності системи логістичного забезпечення військових частин і окремих підрозділів під час ведення бойових дій.

У публікації [6] проведено аналіз організації продовольчого забезпечення передових позицій військових підрозділів Збройних Сил України в умовах постійного розвідувально-ударного впливу противника. Систематизовано практичні підходи до формування номенклатури, маси та способів пакування вантажів для безпілотного доставляння в зоні активних бойових дій з урахуванням вимог безпеки, збереження майна та технічних обмежень безпілотних платформ.

У [9] визначено механізми планування та організації логістичного забезпечення визначеного складу військ (сил, органів) Збройних Сил, а також інших складових сил безпеки та оборони. Встановлені основні принципами, на яких базується логістичне забезпечення сил оборони під час їх підготовки та в ході застосування.

У роботі [10] проведено моделювання логістики перевезень у різномірній транспортній мережі для забезпечення своєчасного доставляння військових вантажів в умовах можливих запізнь та ризиків, які впливають на величину збитків у зоні бойових дій. Крім того, досліджено спроможності автомобільного та залізничного транспорту.

Стаття [11] присвячена дослідженню ролі й перспектив використання БПЛА та наземних роботизованих систем у військовій логістиці. Автор аналізує сучасні виклики забезпечення військ МТЗ в умовах високої інтенсивності бойових дій та демонструє, що дрони є інноваційним інструментом для оптимізації процесів постачання.

У [12] розглянуто сучасні технології, які підтримують застосування дронів, включаючи штучний інтелект, алгоритми оптимізації маршрутів та інтеграцію з наземним транспортом. Автори наголошують на важливості міждисциплінарного підходу до розроблення та впровадження дронів у логістику, що дозволить максимізувати переваги цієї технології.

Дослідження щодо оцінювання рівня загроз громадянам (а у воєнний час – військовослужбовцям), у разі застосування стрілецької зброї різного калібру, зокрема з імовірністю використання дробу по безпілотних літальних апаратах, проведено в [13].

Формулювання завдання дослідження. Незважаючи на технологічний прогрес у розробленні БПЛА, залишається не вирішеним досі питання системної інтеграції безпілотних засобів у єдиний логістичний цикл. Відомі підходи базуються на детермінованих моделях, які не враховують особливостей логістичного забезпечення, пов'язаних із використанням безпілотних систем. Відсутність науково обґрунтованого математичного апарату для формування раціональних планів доставляння призводить до надмірних витрат та несвоєчасного забезпечення підрозділів. Саме тому **метою** статті є розроблення підходу до визначення раціонального плану доставляння військових вантажів на лінії бойового зіткнення з використанням БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо підрозділ тактичного рівня, який виконує бойові завдання на лінії бойового зіткнення. У його позиційному районі розгорнуто пункт постачання та стартові майданчики для БпЛА, на які покладено завдання логістичного забезпечення передових позицій (споживачів) підрозділу.

Від споживачів до пункту постачання надходять замовлення на доставляння товарів військового призначення різного типу: медикаментів, боєприпасів, харчових продуктів тощо. Їх запасів на пункті постачання достатньо, щоб задовільнити потреби, тому кожний споживач повинен отримати необхідну кількість товару. За замовленнями, що надійшли, формується вантаж на відправлення, який має різну масу та габаритні розміри.

Доставляння вантажів до споживача може здійснюватися БпЛА різних типів, кількість яких є обмеженою. Кожен тип характеризується специфічними параметрами, зокрема вантажопідйомністю, здатністю транспортувати вантажі різних габаритів та з різною швидкістю виконання транспортних операцій.

Підготовка вантажів до відправлення та їх відповідне пакування проводиться на пункті постачання.

Необхідно сформулювати оптимальний план перевезень, який забезпечить мінімізацію сумарного часу доставляння вантажів кінцевим споживачам. У ньому слід чітко визначити: який транспортний засіб призначений для транспортування конкретного вантажу, послідовність виконання перевезень, маршрути їх здійснення, а також кількість рейсів, необхідних для повного забезпечення доставляння.

З метою математичної формалізації поставленого завдання введемо такі позначення для параметрів системи:

а) граф мережі: $G = (V, E)$, де $V = \{0, 1, \dots, m\}$ – множина вузлів (0 – пункт постачання, $\{1, \dots, m\}$ – споживачі, E – множина шляхів між пунктом постачання та споживачами з відстанями $L = \{1, \dots, j\}$;

б) товари: $I = \{1, \dots, i\}$ – множина типів товарів, для кожного з них $i \in I$ відома маса ω_i , об'єм v_i та кількість d_i ;

в) замовлення: $F_i = \{1, \dots, f_i\}$ – кількість i -го товару, замовленого споживачем;

г) наявний парк БпЛА: $K = \{1, \dots, k\}$ – множина типів БпЛА, для кожного з них $k \in K$ відома максимальна вантажопідйомність Q_k , максимальний корисний об'єм вантажу V_k , середня швидкість доставляння вантажів s_k та їх кількість n_k ;

д) рейси: $R = \{1, \dots, r\}$ – множина номерів рейсів БпЛА;

ж) параметр пріоритетності споживачів: для кожного споживача $m \in V$ вводимо коефіцієнт $P_m \geq 1$. Чим вище число P_m , тим важливішим є швидке доставляння.

Введемо змінну $x_{imj}^{n_k, r}$, яка вказує на кількість вантажу i -го типу, що доставляється n -м БпЛА k -го типу в r -му рейсі m -му споживачу j -м маршрутом.

Тоді цільова функція може бути описана співвідношенням:

$$T_D = \sum_{n_k=1}^{N_k} \sum_{r=1}^R \sum_{d_i=1}^{D_i} \sum_{(V,E) \in G} \left(\frac{L_j}{s_k} + \tau_{d_i} \right) x_{imj}^{n_k, r} \rightarrow \min, \quad \forall k \in K, \forall i \in I, \quad (1)$$

де T_d – сумарний час доставляння військових вантажів споживачам;

τ_{d_i} – середній час завантаження i -го військового вантажу в d -ї кількості (включає витрати часу на підготовку БпЛА до польоту).

План перевезень становить собою кортеж:

$$W = \{n_k, r, P_{ath}, C, T_{start}, T_{end}\}, \quad (2)$$

де n_k – ідентифікатор (ID) конкретного БпЛА;

r – порядковий номер рейсу для цього БпЛА;

$P_{ath} = (0, j_1, j_2, \dots, 0)$ – упорядкована послідовність точок маршруту;

$C = \{x_{imj}^{n_k, r}\}$ – кількість кожного товару, що відвантажується споживачу в рейсі (з урахуванням можливості розділення замовлення);

T_{start}, T_{end} – часові мітки вильоту та повернення БпЛА.

Для побудови плану (2) необхідно врахувати:

1) обмеження за вантажопідйомністю, а саме: сумарна маса всіх товарів, завантажених на n -й БпЛА k -го типу, не повинна перевищувати його вантажопідйомність:

$$\sum_{d_i=1}^{D_i} \sum_{m=1}^V \sum_{j=1}^E \omega_{d_i}^{n_k} \cdot x_{imj}^{n_k, r} \leq Q_k, \quad \forall i \in I, \quad (3)$$

де $\omega_{d_i}^{n_k}$ – маса d_i -го вантажу, завантаженого на n -й БпЛА k -го типу;

2) обмеження за об'ємом вантажу: сумарний об'єм усіх товарів, завантажених на n -й БпЛА k -го типу не повинен перевищувати допустимо можливий V_k :

$$\sum_{d_i=1}^{D_i} \sum_{m=1}^V \sum_{j=1}^E v_{d_i}^{n_k} \cdot x_{imj}^{n_k, r} \leq V_k, \quad \forall i \in I, \quad (4)$$

де $v_{d_i}^{n_k}$ – об'єм d_i -го вантажу, розміщеного на n_k -му БпЛА;

3) обмеження за замовленням: кожний споживач повинен отримати замовлену кількість товару:

$$\sum_{d_i=1}^{D_i} \sum_{j=1}^E d_i \cdot x_{imj}^{n_k, r} \geq F_i, \quad \forall i \in I, \quad \forall m \in V; \quad (5)$$

4) обмеження за координацією польотів: виліт n -го БпЛА k -го типу для виконання наступного замовлення відбувається лише після його повернення, підготовки та завантаження:

$$ST_{n_k}^{r+1} \geq AT_{n_k}^r + \tau_{d_i}, \quad \forall k \in K, \quad (6)$$

де $ST_{n_k}^{r+1}$ – час відправлення n -го БпЛА k -го типу в наступний рейс;

AT_{nk}^r – час повернення n -го БПЛА k -го типу з рейсу.

Запропонована математична модель (1)–(6) дозволяє трансформувати логістичну задачу забезпечення передових позицій тактичного підрозділу в задачу цілочисельного лінійного програмування, де оптимальний план перевезень (2) знаходимо шляхом мінімізації функції (1) та дотримання обмежень (3)–(6).

Ця задача є складною. Для її розв'язання за умови наявності 20–30 споживачів можна використати метаевристичні методи [14]. Однак у реальних умовах у тактичному підрозділі рівня роти (взводу) з одного пункту постачання може забезпечуватися не більше 10 передових підрозділів, тому для її розв'язання можуть використовуватися точні методи (симплекс-метод, метод гілок і меж, ітераційний метод тощо) [15].

Розв'язання задачі (1)–(6) пропонуємо проводити в декілька етапів.

На першому для кожного типу БПЛА розраховуємо матрицю відстаней та часу, при цьому враховуємо середню швидкість польоту БПЛА з максимальним навантаженням.

На другому етапі проводиться генерація рейсів. Оскільки БПЛА повертається і знову завантажується, пропонуємо кожен виліт розглядати як окремий, але з часовими обмеженнями (другий рейс не може початися раніше завершення першого з урахуванням затримок часу на завантаження та підготовку БПЛА).

На третьому відбувається розподіл замовлень. Якщо вантаж, замовлений споживачем, перевищує місткість БПЛА, то його необхідно розділити на кілька рейсів або кілька дронів.

Четвертим етапом є врахування пріоритетів. У цільовій функції проводиться мінімізація сумарного часу доставляння вантажів з урахуванням важливості замовлень. Це змушує обирати найшвидші БПЛА, здатні задовільнити потребу споживачів із найвищим пріоритетом у першу чергу.

Кінцевим етапом є формування плану доставляння вантажів із зазначенням ідентифікатора БПЛА, кількості рейсів, маршруту, таймінгу та вантажів, що доставляються споживачеві.

Для перевірки працездатності запропонованого підходу та вироблення дієвих рекомендацій для вихідних даних (табл. 1–2) проведемо відповідні розрахунки.

Таблиця 1

Дані щодо БПЛА

| № з/п | ID БПЛА | Швидкість, м/с | Вантажопідйомність, кг | Кількість, шт |
|-------|---------|----------------|------------------------|---------------|
| 1 | A | 11 | 10 | 1 |
| 2 | B | 17 | 2,7 | 1 |
| 3 | C | 15 | 0,6 | 3 |

Таблиця 2

Дані про споживачів

| № з/п | ID споживача | Відстань до пункту постачання, км | Маса замовлення, кг | Пріоритет замовлення |
|-------|--------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | I | 3 | 8 | Низький |
| 2 | II | 7 | 4 | Низький |
| 3 | III | 5 | 6 | Високий |
| 4 | IV | 4 | 12 | Високий |

Об'єм вантажів знаходиться в межах габаритів БПЛА, час його завантаження та підготовки $\tau_{d_i} = 10$ хв.

Розрахунки проведемо методом пріоритетних ітерацій [14] для випадків:

однієї обслуги пілотів та послідовної підготовки БПЛА (вантаж) до польоту (табл. 3);
двох обслуг пілотів та паралельної підготовки двох БПЛА (вантаж) до польоту (табл. 4);

трьох обслуг пілотів та паралельної підготовки трьох БПЛА (вантаж) до польоту (табл. 5).

Наявність лише однієї обслуги пілотів означає, що всі рейси виконуються послідовно один за одним. Наступний рейс починається лише після повернення БПЛА, його підготовки та завантаження.

Таблиця 3

План доставляння вантажів однією обсергою пілотів у разі послідовної підготовки БПЛА

| № з/п | ID БПЛА | ID споживача | Маса вантажу, кг | Час початку завантаження, с | Час вильоту, с | Час доставляння, с | Час повернення, с |
|-------|---------|--------------|------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|-------------------|
| 1 | A | IV | 10 | 0 | 600 | 964 | 1328 |
| 2 | B | IV | 2 | 1328 | 1928 | 2163 | 2398 |
| 3 | B | III | 2,7 | 2398 | 2998 | 3292 | 3586 |
| 4 | B | III | 2,7 | 3586 | 4186 | 4480 | 4774 |
| 5 | C | III | 0,6 | 4774 | 5374 | 5707 | 6040 |
| 6 | A | II | 8 | 6040 | 6640 | 6913 | 7186 |
| 7 | A | I | 4 | 7186 | 7786 | 8422 | 9058 |

Таблиця 4

План доставляння вантажів двома обсергами пілотів у разі паралельної підготовки БПЛА

| № з/п | ID БПЛА | № обслуги | ID споживача | Маса вантажу, кг | Час початку завантаження, с | Час вильоту, с | Час доставляння, с | Час повернення, с |
|-------|---------|-----------|--------------|------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|-------------------|
| 1 | A | 1 | IV | 10 | 0 | 600 | 964 | 1328 |
| 2 | B | 2 | IV | 2 | 0 | 600 | 835 | 1070 |
| 3 | C1 | 2 | III | 0,5 | 1070 | 1670 | 2003 | 2336 |
| 4 | C2 | 1 | III | 0,5 | 1328 | 1928 | 2261 | 2594 |
| 5 | B | 2 | III | 2,7 | 2336 | 2936 | 3230 | 3524 |
| 6 | C3 | 1 | III | 0,5 | 2594 | 3194 | 3527 | 3860 |
| 7 | A | 2 | I | 8 | 3524 | 4124 | 4397 | 4670 |
| 8 | B | 1 | III | 1,8 | 3860 | 4460 | 4754 | 5048 |
| 9 | C1 | 2 | II | 0,6 | 4670 | 5270 | 5737 | 6204 |
| 10 | B | 1 | II | 2,7 | 5048 | 5648 | 6060 | 6472 |
| 11 | C2 | 2 | II | 0,4 | 6204 | 6804 | 7271 | 7738 |
| 12 | C3 | 1 | II | 0,4 | 6472 | 7072 | 7539 | 8006 |

Таблиця 5

План доставляння вантажів трьома обслугами пілотів у разі паралельної підготовки БпЛА

| № з/п | ID БпЛА | № обслуги | ID споживача | Маса вантажу, кг | Час початку завантаження, с | Час вильоту, с | Час доставляння, с | Час повернення, с |
|-------|---------|-----------|--------------|------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|-------------------|
| 1 | A | 1 | IV | 10 | 0 | 600 | 964 | 1328 |
| 2 | B | 2 | IV | 2 | 0 | 600 | 835 | 1070 |
| 3 | C1 | 3 | III | 0,5 | 0 | 600 | 933 | 1266 |
| 4 | B | 2 | III | 2,7 | 1070 | 1670 | 1964 | 2258 |
| 5 | C2 | 3 | III | 0,5 | 1266 | 1866 | 2199 | 2532 |
| 6 | A | 1 | III | 2,3 | 1328 | 1928 | 2383 | 2838 |
| 7 | B | 2 | I | 2,7 | 2258 | 2858 | 3034 | 3210 |
| 8 | C3 | 3 | I | 0,5 | 2532 | 3132 | 3332 | 3532 |
| 9 | A | 1 | I | 4,8 | 2838 | 3438 | 3711 | 3984 |
| 10 | B | 2 | II | 2,7 | 3210 | 3810 | 4222 | 4634 |
| 11 | C1 | 3 | II | 0,5 | 3532 | 4132 | 4598 | 5064 |
| 12 | C2 | 3 | II | 0,5 | 4634 | 5234 | 5700 | 6166 |
| 13 | C3 | 2 | II | 0,5 | 5064 | 5664 | 6130 | 6596 |

Проведені розрахунки свідчать, що для доставляння всіх вантажів одній обслугі пілотів знадобиться здійснити сім рейсів загальною тривалістю 2 год 31 хв. При цьому 95 хв буде витрачено на доставляння пріоритетних вантажів (замовник III, IV), а 70 хв – на завантаження всіх замовлень та підготовку БпЛА до польоту.

Використання двох обслуг БпЛА дозволить застосувати паралельні методи роботи та доставити вантаж за 2 год 14 хв, що на 11,6% швидше. При цьому пріоритетні вантажі будуть доставлені за 59 хв. Загальна кількість рейсів становитиме 12.

У разі введення додаткової умови на мінімізацію кількості рейсів план доставляння набуде іншого вигляду (табл. 6).

Таблиця 6

План доставляння вантажів за умови мінімізації кількості рейсів та загального часу

| № з/п | ID БпЛА | № обслуги | ID споживача | Маса вантажу, кг | Час початку завантаження, с | Час вильоту, с | Час доставляння, с | Час повернення, с |
|-------|---------|-----------|--------------|------------------|-----------------------------|----------------|--------------------|-------------------|
| 1 | A | 1 | IV | 10 | 0 | 600 | 964 | 1328 |
| 2 | B | 2 | IV | 2 | 0 | 600 | 835 | 1070 |
| 3 | B | 2 | III | 2,7 | 1070 | 1670 | 1964 | 2258 |
| 4 | A | 1 | III | 3,3 | 1328 | 1928 | 2383 | 2838 |
| 5 | B | 2 | II | 2,7 | 2258 | 2858 | 3270 | 3682 |
| 6 | A | 1 | I | 8 | 2838 | 3438 | 3711 | 3984 |
| 7 | B | 2 | II | 1,3 | 3682 | 4282 | 4694 | 5106 |

З табл. 6 випливає, що необхідна кількість рейсів становитиме 7, а загальний час на їх проведення – 1 год 25 хв, зокрема на доставляння пріоритетного вантажу буде витрачено близько 39,7 хв. Це зумовлено відмовою від використання БпЛА, які мають низьку вантажопідйомність, що, у свою чергу, дозволить зменшити кількість рейсів та скоротити загальний час постачання на 22,5%, а час доставляння пріоритетних замовлень – на 32,7%.

У разі застосування трьох обслуг БпЛА (табл. 5), за умови їх паралельної підготовки, загальний час проведення рейсів буде становити 1 год 50 хв, із них на доставляння пріоритетного вантажу – близько 39,7 хв. Отже, збільшення кількості обслуг БпЛА до трьох не призводить до зростання швидкості доправлення пріоритетного вантажу, тому найкращим варіантом доставляння визначених вантажів, відповідно до заданих умов, є застосування двох обслуг для БпЛА типу А та В із паралельною їх підготовкою до вильоту. Цей варіант забезпечує мінімальний час доставляння без надлишкових витрат на постачання ресурсів.

Висновки. Проведений аналіз особливостей логістичного забезпечення підрозділів тактичного рівня на лінії бойового зіткнення свідчить про неможливість використання штатних транспортних засобів для доставляння військових вантажів передовим підрозділам, тому в сучасній війні з цією метою застосовують наземні та повітряні роботизовані платформи.

Проведено математичну формалізацію задачі визначення раціонального плану доставляння військових вантажів із використанням БпЛА як задачу цілочисельного лінійного програмування, направлену на мінімізацію часу доправлення всіх необхідних вантажів до передових позицій з урахуванням наявних ресурсних обмежень.

Запропоновано підхід до вирішення завдання визначення раціонального плану доставляння, проведено його апробацію. Встановлено, що отримані результати дозволяють сформулювати раціональну послідовність цього процесу та зменшити часові витрати.

Досліджено послідовний та паралельний методи підготовки БпЛА залежно від кількості обслуг пілотів, об'ємів та пріоритетності замовлень. Встановлено, що для виконання завдань логістичного забезпечення необхідно застосовувати БпЛА збільшеної вантажопідйомності, при цьому підготовку їх до польотів слід проводити паралельним методом. Малорозмірні швидкісні БпЛА слід використовувати для доставляння дрібних вантажів першої необхідності.

У подальших дослідженнях доцільно зосередити увагу на аналізі ефективності застосування кількох пунктів постачання для підвищення рівня забезпечення військових підрозділів та оптимізації стратегій доставляння матеріально-технічних ресурсів. Такий підхід дозволить розробити більш гнучкі та адаптивні моделі логістичного забезпечення, що враховують просторову диференціацію ресурсних потоків та мінімізують часові витрати на транспортування.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. ОП 3-0(46). Безпілотні системи. Доктрина : Об'єднана ключова доктринальна військова публікація. Київ : Міністерство оборони України, 2026. 28 с.

2. ДСТУ В 7371:2020. Техніка авіаційна державної авіації. Апарати літальні безпілотні: Основні терміни та визначення понять. Класифікація. [Чинний від 2020.05.06]. Вид. офіц. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2021. IV. 12 с.
3. ВП 4-00(46).32. Технічні вимоги до транспортних безпілотних літальних апаратів у складі транспортних безпілотних авіаційних комплексів (систем), затв. Міністром оборони України 24.02.2025. Київ : Міністерство оборони України, 2025. 12 с.
4. Гресь О. М. Оптимізація логістичних процесів забезпечення військових підрозділів в умовах активних бойових дій: український досвід // Науковий вісник Міжнар. гуманітарного ун-ту. Серія: Юриспруденція. 2024. № 71. С. 4–7. URL: <https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc71/3.pdf> (дата звернення: 01.04.2026).
5. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів при виконанні завдань логістичного забезпечення військ в сучасних збройних конфліктах / А. А. Леках, О. М. Гурін, В. В. Старцев та ін. // Зб. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. 2022. № 1 (71). С. 49–57. <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.71.05>
6. Bulhakov R., Puhachova D., Zamkova I. Analysis of the Organization of Logistics Support of Advanced Positions in Modern Conditions of Combat Actions // Social Development and Security. 2025. Т. 15, № 6. С. 152–164. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.15>
7. DJI Matrice 300/350 RTK: посібник користувача. Редакція українською мовою. QUADRO, 2024. 123 с. URL: https://quadro.ua/wp-content/uploads/2024/05/matrice_350_rtk_user_manual_ua_web.pdf (дата звернення: 01.04.2026).
8. Corvo UAS. The Corvo Precision Payload Delivery System (PPDS). URL: <https://corvouas.com.au/corvo-ppds> (last accessed: 01.04.2026).
9. Про затвердження Порядку логістичного забезпечення сил оборони під час виконання завдань з оборони держави, захисту її суверенітету, територіальної цілісності та недоторканності : постанова Кабінету Міністрів України. № 950 від 20.08.2024 (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/950-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.04.2026).
10. Моделювання транспортної логістики військових вантажів з урахуванням збитків, які виникають у зоні бойових дій через запізнення у постачанні / О. Є. Федорович, О. С. Уруський, І. Б. Чепков та ін. // Radioelectronic and Computer Systems. 2022. № 2 (102). С. 63–74.
11. Minculete G. Military Logistics Drones: the Innovative Solution for Transportation Challenges on the Battlefield // Land Forces Academy Review. 2025. Vol. 30, № 2. <https://doi.org/10.2478/raft-2025-0033>
12. Лещенко Ю., Мороз І., Юхимчук М. Використання UAV (дронів) для оптимізації доставки останньої милі // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2024. № 4. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-53>
13. Methodology for Assessing the Level of Threats when Using Small Arms Against Unmanned Aerial Vehicles / V. Mirnenko, S. Novichenko, & O. Doska et al. // Advances in Military Technology. 2022. № 17 (1). P. 107–120. <https://doi.org/10.3849/aimt.01486>
14. Pinedo M. L. The Makespan without Preemptions // Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. 3rd ed. New York : Springer, 2008. 676 p.

15. Іглін С. П., Зайцев Ю. І., Решетняк Ю. Б. Лінійне програмування : навч. посіб. Харків : НТМТ, 2023. 120 с.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2026.

Прийнято до друку 08.05.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. *OP 3-0(46). Bezpilotni systemy. Doktryna: Obiednana kliuchova doktrynalna viiskova publikatsiia [Unmanned Systems. Doctrine: Joint Key Doctrinal Military Publication].* Kyiv [in Ukrainian].
2. *DSTU V 7371:2020. Tekhnika aviatsiina derzhavnoi aviatsii. Aparaty litalni bezpilotni: Osnovni termini ta vyznachennia poniat. Klasyfikatsiia [State Aviation Aircraft Equipment. Unmanned Aircraft: Basic Terms and Definitions. Classification].* (2020). Official edition. Kyiv: Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems [in Ukrainian].
3. *VP 4-00(46).32. Tekhnichni vymohy do transportnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ u skladi transportnykh bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv (system) [Technical Requirements for Transport Unmanned Aerial Vehicles with in Transport Unmanned Aviation Complexes (Systems)].* (2025). Kyiv [in Ukrainian].
4. Hres, O. M. (2024). Optymizatsiia lohistychnykh protsesiv zabezpechennia viiskovykh pidrozdiliv v umovakh aktyvnykh boiovykh dii: ukrainskyi dosvid [Optimization of Logistics Processes of Military Units Support Under Active Combat Conditions: Ukrainian Experience]. *Naukovyi visnyk Mizhnar. humanitarnoho un-tu. Seriia: Yurysprudentsiia [Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Series: Jurisprudence], 71, 4–7.* Retrived from <https://vestnik-pravo.mgu.od.ua/archive/juspradenc71/3.pdf> [in Ukrainian].
5. Lekakh, A. A., Hurin, O. M., & Startsev, V. V., et al. (2022). Osoblyvosti zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ pry vykonanni zavdan lohistychnoho zabezpechennia viisk v suchasnykh zbroinykh konfliktakh [Application Features of Unmanned Aerial Vehicles in Performing the Logistic Support Tasks for the Troops in Modern Armed Conflicts]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Scientific Works of Kharkiv National Air Force University], 1 (71), 49–57.* <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.71.05> [in Ukrainian].
6. Bulhakov, R., Puhachova, D., & Zamkova, I. (2025). Analysis of the Organization of Logistics Support of Advanced Positions in Modern Conditions of Combat Actions. *Social Development and Security, 15, 6, 152–164.* <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.15>
7. *DJI Matrice 300/350 RTK: posibnyk korystuvacha. Redaktsiia ukrainskoii movoiu [User Manual. Ed. Ukrainian].* (2024). Retrived from https://quadro.ua/wp-content/uploads/2024/05/matrice_350_rtk_user_manual_ua_web.pdf
8. Corvo UAS. Corvo PPDS. (n. d.). Retrived from <https://corvouas.com.au/corvo-ppds>
9. *Pro zatverdzhennia Poriadku lohistychnoho zabezpechennia syl oborony pid chas vykonannia zavdan z oborony derzhavy, zakhystu yii suverenitetu, terytorialnoi tsilisnosti ta*

nedotorkannosti: postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy [On Approval of the Procedure for Logistical Support of the Defense Forces During the Performance of Tasks Related to the Defense of the State, Protection of Its Sovereignty, Territorial Integrity and Inviolability: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine]. № 950 from 20.08.2024. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/950-2024-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].

10. Fedorovych, O. Ye., Uruskyi, O. S., & Chepkov, I. B., et al. (2022). Modeliuvannia transportnoi lohistyky viiskovykh vantazhiv z urakhuvanniam zbytkiv, yaki vynykaiut u zoni boiovykh dii cherez zapiznennia u postachanni [Simulation of Transport Logistics of Military Cargo Considering the Losses Occurring in the War Zone Due to Delays in Delivery]. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2 (102), 63–74 [in Ukrainian].

11. Minculete, G. (2025). Military Logistics Drones: the Innovative Solution for Transportation Challenges on the Battlefield. *Land Forces Academy Review*, 30, 2. <https://doi.org/10.2478/raft-2025-0033>

12. Leshchenko, Yu., Moroz, I., & Yukhymchuk, M. (2024). Vykorystannia UAV (droniv) dlia optymizatsii dostavky ostannoï myli [Use of UAVs (Drones) for Optimizing Last-Mile Delivery]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh [Measuring and computing devices in technological processes]*, 4. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-53> [in Ukrainian].

13. Mirnenko, V., Novichenko, S., & Doska, O., et al. (2022). Methodology for Assessing the Level of Threats when Using Small Arms Against Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Military Technology*, 17 (1), 107–120. <https://doi.org/10.3849/aimt.01486>

14. Pinedo, M. L. (2008). *The Makespan without Preemptions. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. 3rd ed. New York: Springer.

15. Ihlin, S. P., Zaitsev, Yu. I., & Reshetniak, Yu. B. (2023). *Liniine prohramuvannia: navch. posib. [Linear Programming: A Study Guide]*. Kharkiv [in Ukrainian].

P. V. Openko, O. M. Doska, O. M. Sampir

DETERMINATION OF A RATIONAL DELIVERY PLAN FOR MILITARY CARGO AT THE LINE OF CONTACT USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

The experience of the Russia – Ukraine war indicates that, since 2023, it has been undergoing a technological transformation. Unmanned Aerial Vehicles have become the primary instrument for reconnaissance and strike. The battlefield has effectively turned into an open observation space: any concentration of equipment is rapidly detected and destroyed. Due to the development of Unmanned Aerial Vehicles, the “grey zone” (territory controlled by neither side) has expanded. Previously, it could extend for several hundred meters; now, owing to continuous aerial monitoring, it may reach up to 5 km, where any presence of personnel or equipment immediately triggers fire.

Under such conditions, the issue of providing logistical support to units using standard vehicles becomes almost impossible. Therefore, the use of Unmanned Aerial Vehicles for logistics has evolved from an experiment into a vital necessity, particularly for units along the line of contact, where conventional transport is destroyed within minutes.

The delivery of military cargo (materiel) to the line of contact by Unmanned Aerial Vehicles is associated with a number of challenges, namely: the enemy's use of Electronic Warfare systems, the limited payload capacity of Unmanned Aerial Vehicles, dependence on weather conditions, and others. All of this significantly complicates the management of logistical support and requires more substantiated decision-making when determining strategies and delivery plans for supplying units with military cargo using Unmanned Aerial Vehicles.

The article formalizes the problem of determining an optimal plan for the delivery of materiel on the line of contact using Unmanned Aerial Vehicles and examines a methodological approach to its solution.

Keywords: *logistical support; Unmanned Aerial Vehicle; ammunition; shot; line of contact; military cargo; transportation plan.*

Д. А. Іщенко, канд. техн. наук, доц.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0001-9743-3889>

В. В. Стрінада, канд. техн. наук, доц.
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-0604-7673>

ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИКРИТТЯ ОБ'ЄКТА ЗА КОНЦЕПТУАЛЬНОЮ МОДЕЛЛЮ ПОХИБОК НАВІГАЦІЇ УДАРНИХ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ

У статті досліджено результативність радіоелектронного прикриття об'єкта, що здійснюється з використанням засобів радіоелектронної боротьби, як ступінь зниження ефективності ударів безпілотних систем, яка розглядається, зокрема, як реалізація їх можливостей щодо високоточних ударів по цілях. Такі можливості безпілотних систем безпосередньо залежать від використання різних систем навігації, передусім інерціальних. Функціонування безпілотних систем автономне, але воно передбачає комплексування із системами навігації, що працюють із зовнішніми джерелами навігаційної інформації. Підтримання точності наведення полягає в періодичному корегуванні даних інерціальних навігаційних систем із даними, отриманими бортовими радіоелектронними засобами каналів глобальних супутникових навігаційних систем. За його відсутності, кількість помилок визначення координат власного місцеположення та їх змін у часі збільшується, це погіршує навігацію безпілотних систем щодо наведення на запрограмовані об'єкти. Зростання середньоквадратичних помилок у системах навігації місцеположення безпілотних систем, що є пропорційним до часу подавлення каналів глобальних супутникових навігаційних систем, зменшує ймовірність влучання в ціль і, відповідно, знижує їх ефективність.

У сучасних бойових діях масоване застосування безпілотних систем зумовлює комплексні виклики для сил і засобів радіоелектронної боротьби, зокрема щодо подавлення каналів глобальних супутникових навігаційних систем засобів повітряного нападу. У статті запропоновано концептуальну модель похибок навігації, яка поєднує класичні метричні показники точності (кругове ймовірне відхилення та середньоквадратичне відхилення за відстанню) із практичними моделями зростання похибки інерціальних навігаційних систем за впливом засобами радіоелектронної боротьби, перешкодами на бортові радіоелектронні засоби каналів глобальних супутникових навігаційних систем засобів повітряного нападу. Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність радіоелектронного прикриття об'єкта не лише за параметрами похибок, а й за показниками, що визначаються факторами

радіоелектронної обстановки. Це забезпечує можливість адаптації апарату оцінювання до реальних умов та створює основу для багаторівневого планування ресурсів у системі протидії безпілотним загрозам.

Ключові слова: безпілотна система; глобальна супутникова навігаційна система; інерціальна навігаційна система; засоби повітряного нападу; система навігації; кругове ймовірне відхилення; похибка навігації; середньоквадратичне відхилення; радіоелектронна боротьба; ефективність прикриття.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Масове застосування безпілотних систем (БпС) у сучасних бойових діях радикально змінює характер загроз та вимоги до систем протидії. БпС охоплюють широкий спектр платформ – від малих розвідувальних апаратів до ударних комплексів, що діють у повітрі, на землі та в морському середовищі. Їхня ефективність, з огляду на точність доставляння корисного навантаження в потрібне місце в заданий час, обмежується навігаційними можливостями, а саме похибками визначення власного місцеположення в просторі та часі, що змінюються. Такі можливості БпС безпосередньо залежать від характеристик різних систем навігації (СН), передусім уже традиційних – автономних інерціальних навігаційних систем (ІНС). Елементи ІНС, зокрема гіроскопи, прилади стабілізації, автопілоти, курсовказувачі, датчики кутової швидкості та інші компоненти пілотажно-навігаційних комплексів, широко застосовують у безпілотних літальних апаратах (БпЛА) різних класів. Залежності від вимог за призначенням до БпС визначають потрібні (припустимі, граничні) помилки наведення, що обумовлює застосування в їх СН елементів різних класів ІНС, що відрізняються технічною досконалістю та відповідною вартістю.

Аналіз досвіду застосування БпС різного класу підтверджує:

по-перше, можливість застосування ІНС різного ступеня точності: мікроелектромеханічних систем, волоконно-оптичних гіроскопів, лазерних гіроскопів із кільцевим резонатором та гіроскопів з напівсферичним резонатором, що комплексуються комбінованими рішеннями із застосуванням високоточних технологій кінематичної навігації в реальному часі (Real Time Kinematic – RTK) та антен із керованою діаграмою спрямованості приймання (АКДС);

по-друге, функціонування таких систем автономне, але застосування ІНС у СН БпС передбачає корегування даних шляхом комплексування з навігаційними системами, що працюють із зовнішніми джерелами навігаційної інформації;

по-третє, за відсутності можливості такого корегування, помилки визначення координат власного місцеположення та їх змін у часі зростають (пропорційно до часу неможливості корегування), що погіршує навігацію БпС щодо наведення на запрограмовані об'єкти;

по-четверте, як правило, підтримання точності наведення включає періодичне корегування даних ІНС із тими, що отримані бортовими радіоелектронними засобами (РЕЗ) каналів глобальних супутникових навігаційних систем (ГСНС);

по-п'яте, залежність БпС від навігаційних технологій, що передбачають застосування бортових приймальних РЕЗ у каналах супутникової навігації, робить їх вразливими до радіоелектронних перешкод, організованих із використанням засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Отже, зростання середньоквадратичних помилок у СН БпС, пропорційне до часу подавлення каналів ГСНС, зменшує ймовірність влучання в ціль і, відповідно, знижує їх ефективність.

Водночас для ефективного радіоелектронного прикриття (РЕПр) об'єктів від розвідки й високоточних ударів БпС (включно з БпЛА) та іншими засобами повітряного нападу (ЗПН) (керованими (корегованими) авіаційними бомбами, а також крилатими, аеробалістичними та балістичними ракетами) необхідно мати інструменти, що дозволяють кількісно оцінювати похибки навігації та прогнозувати їхній вплив на результативність бойового застосування. За відсутності таких інструментів оцінювання ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації виникає проблема планування застосування як засобів РЕБ, так і БпС в умовах навігаційного протиборства (навігаційної війни).

З огляду на викладене вище можна стверджувати, що дослідження підходів до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта засобами РЕБ за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС є актуальним науково-практичним завданням, а розроблення такого науково обґрунтованого підходу є підґрунтям для розв'язання проблеми планування застосування цих засобів в умовах навігаційного протиборства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки характеризуються стрімким зростанням кількості досліджень, присвячених проблемі протидії БпС та розвитку засобів РЕБ. Аналіз літературних джерел показує, що ця тематика охоплює як фундаментальні стандарти кількісного оцінювання, так і прикладні військові доктрини, аналітичні огляди сучасних конфліктів та технічні звіти [1, 2].

Теоретичні основи та класичні моделі заклали фундамент для використання метрик кругового ймовірного відхилення (КЙВ) та середньоквадратичного відхилення (СКВ) у [1, 2]. Показано, що ймовірнісні моделі є універсальним інструментом для оцінювання точності СН і дають математичний апарат, який можна адаптувати до сучасних сценаріїв застосування БпЛА та РЕБ.

У статтях [3, 4] досліджено похибки ІНС, показано їх анізотропію та запропоновано моделі дрейфу. У [5–8] деталізовано джерела похибок ІНС та методи їх компенсації. Зазначено, що похибки ІНС зростають із часом, тому моделювання їхнього дрейфу є критичним для оцінювання ефективності РЕБ.

У [9–16] показано різні рівні точності ГСНС у базовому режимі та в режимі RTK, який значно знижує похибки, але залежить від корекційних сигналів, що можуть бути заблокованими засобами РЕБ. Доведено, що ГСНС є вразливим до глушіння та спуфінгу, що, відповідно, підтверджує актуальність моделювання впливу РЕБ.

Приклад високої точності цивільних БпЛА продемонстровано в [9]. У [10–12] описано військовий БпЛА, який модернізовано з базового ГСНС до RTK. Зазначено, що порівняння цих платформ показує різні рівні точності та стійкості до РЕБ.

У публікаціях [13–15] висвітлено доктрини та стандарти електронної боротьби, моделі похибок сенсорів та методи тестування.

У [4–10] проаналізовано ефективність засобів РЕБ Збройних Сил (ЗС) України проти крилатих ракет і БпЛА, показано практичні результати та перспективи їх розвитку.

Підтверджено, що РЕБ реально збільшує похибки навігації противника, знижуючи ймовірність ураження.

У підсумку отримано висновок у контексті узагальнення результатів аналізу досліджень і публікацій щодо проблем навігації безпілотних платформ у певній сукупності факторів та умов сучасних бойових дій:

по-перше, зібрана інформація надає можливість для формування теоретичної бази оцінювання ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС;

по-друге, обмежена кількість робіт, що поєднують теоретичні моделі похибок із практичними рекомендаціями для планування зон прикриття, не надають науково-обґрунтованого підходу до оцінювання ефективності РЕПр.

Формулювання завдання дослідження. За викладених вище умов необхідним є розроблення науково обґрунтованого підходу до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС, що заповнює прогалину між теоретичними моделями та реальними бойовими сценаріями.

Така модель повинна враховувати похибки ІНС та ГСНС, фактори РЕБ, переводити їх у практичні метрики ефективності прикриття. Інтеграція цих складових у єдиний порядок забезпечить можливість моделювання впливу РЕБ, підвищить достовірність прогнозування результатів бойового застосування та сприятиме формуванню практичних рекомендацій щодо оптимізації як РЕПр, так і використання безпілотних платформ.

Досягнення поставленої мети передбачає, що за результатами аналізу наукових джерел та реального досвіду з проблематики інерціальної навігації необхідно вирішити часткові взаємопов'язані завдання:

систематизувати формули визначення КЙВ та СКВ для оцінювання точності навігаційних систем [1, 2];

визначити особливості похибок ІНС, їх анізотропію, враховуючи різні класи систем [3, 4];

розробити системи показників для оцінювання ефективності застосування ІНС БпС та засобів РЕБ для РЕПр, зокрема коефіцієнт доступності, радіуси покриття, імовірність промаху та інші операційні метрики.

Отже, дослідження спрямоване на розроблення універсального підходу до оцінювання протиставних значень ефективності засобів РЕБ і БпС в умовах подавлення супутникових каналів навігації, а також ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС, який поєднує теоретичні засади та практичні приклади, забезпечує концептуальний аналіз похибок навігації та дозволяє їх оцінювати. Реалізація поставлених завдань стане основою для розроблення методичних рекомендацій, що підвищать якість планування та застосування сучасних безпілотних платформ і засобів РЕБ для реалізації їх можливостей щодо ураження та прикриття наземних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. У реальних умовах ресурсних обмежень під час планування бою розробляти варіанти дій сил і засобів РЕБ так само, як і БпС, доцільно за сценаріями, умовно оптимістичним та песимістичним.

Оптимістичний сценарій має місце, якщо аналіз результатів оцінювання своїх військ (наявних сил та засобів) і противника, тобто бойових можливостей, показав їх достатність (за бойовим та чисельним складом) для повного (не нижче потрібного) РЕПр власних військ (об'єкта) та/або ураження БпС об'єктів противника. За таким оптимістичним сценарієм розроблення варіантів дій здійснюється відповідно до завдань, а критерієм їх вибору може бути (за частковими показниками): для РЕБ – максимальний (найбільший, найвищий) ступінь прикриття своїх військ; для БпС – максимальний (найбільший, найвищий) ступінь ураження військ (противника).

За відсутності умов оптимістичного сценарію, визначається потреба розроблення варіантів дій щодо виконання поставлених завдань за песимістичним сценарієм. Пропонуємо не розглядати песимістичний сценарій, як прогнозовано найгіршу сукупність, а як такий, що потребує варіантів, що найбільш повно враховують позитивні моменти й дозволяють знизити негативний вплив небажаних факторів і умов загальної тактичної та радіоелектронної обстановки. У такому разі розроблення варіантів дій залежить від спроможностей.

Звісно, таке розділення сценаріїв має формальний характер, але сприяє розробленню можливих варіантів дій та вибору з-поміж них як мінімум двох найбільш раціональних – доцільних і несуперечливих.

У цьому разі будемо так розуміти терміни:

можливий варіант – такий порядок дій наявних сил і засобів, що прогнозовано приведе до певного ступеня виконання цільового завдання;

раціональний варіант – такий можливий варіант, який на визначений прогнозований час його реалізації є оптимальним (за визначеним критерієм оптимальності);

доцільний варіант відповідає загальному плану (замислу) бою (бойових дій);

несуперечливий варіант узгоджується зі змінами обстановки та плану бою (бойових дій).

Пропонуємо варіант оцінювання (планування зони) прикриття об'єкта з урахуванням того, що:

ударний засіб (ЗПН), що здійснює вихід на об'єкт, у системі керування має канал ГСНС та ІНС (або інші);

у системі прикриття об'єкта є підсистема засобів РЕБ, що здійснюють подавлення каналів ГСНС;

у разі правильної (ефективної) побудови підсистеми РЕБ та подавлення бортових засобів каналів ГСНС, ЗПН здійснює наведення (ближнє) лише за даними ІНС, що (залежно від ступеня її вдосконалення) зменшує ймовірність ураження об'єкта за рахунок накопичення помилок визначення власних координат та швидкості їх зміни.

Розглянемо приклад прогнозування дій екіпажу БпЛА для завдання ударів по цілі та, навпаки, збереження об'єкта за рахунок його РЕПр силами та засобами РЕБ.

Об'єкт (бойова позиція, опорний пункт) знаходиться в тактичній ланці управління, тому, як було зазначено раніше в [17], його доцільно формалізувати площиною, обмеженою колом. Радіус кола, що описує об'єкт, розраховуємо відповідно до лінійних розмірів. Оскільки в [17] було надано порядок його визначення, то в цій статті наведемо лише приклад: $R_1 = 100$ м; $R_2 = 50$ м; $R_3 = 25$ м.

Необхідно визначити СКВ σ СН БпЛА (ударного засобу), за яким прогнозовано виникає подія:

влучання в об'єкт (імовірність ураження достатньо висока);

та, навпаки, невлучання в ціль – збереження об'єкта (імовірність ураження низька).

Обираємо модель похибки, виходячи з того, що для кругових похибок в основному застосовують двовимірний нормальний розподіл із параметром σ .

Розглянемо логіку моделі.

1. Моделюємо похибку наведення як двовимірний нормальний розподіл із параметром σ [18].

2. Враховуємо формулу ймовірності того, що точка падіння потрапить у коло радіусом R , що опишемо таким виразом:

$$P_{\text{попад}} = 1 - e^{-\frac{R_{\text{об'єк}}^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (1)$$

а ймовірність непотрапляння (тобто збереження об'єкта) – у такий спосіб:

$$P_{\text{пром}} = 1 - P_{\text{попад}} = e^{-\frac{R_{\text{об'єк}}^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{попад}}$ – імовірність потрапляння;

$P_{\text{пром}}$ – імовірність непотрапляння;

$R_{\text{об'єк}}$ – радіус цілі (об'єкта);

σ – СКП системи.

Розраховуємо можливі ймовірності за певними СКП. Результати обчислень (див. табл. 1) наведено у відсотках успішності виконання ураження або збереження об'єктів у заданих радіусах.

Таблиця 1

Успішність виконання ураження або збереження об'єктів у заданих радіусах

| СКП σ , м | Ураження $R_1 = 100$ м | Збереження $R_1 = 100$ м | Ураження $R_2 = 50$ м | Збереження $R_2 = 50$ м | Ураження $R_3 = 25$ м | Збереження $R_3 = 25$ м |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 30 | 99,6% (+) | 0,4% (-) | 70,7% | 29,3% (!) | 39,4% (!) | 60,6% (+) |
| 50 | 86,5% (+) | 13,5% (-) | 39,4% (!) | 60,6% (+) | 11,8% (!) | 88,2% (+) |
| 70 | 64,0% (!) | 36,0% (!) | 22,7% | 77,3% (+) | 5,4% (-) | 94,6% (+) |
| 85 | 49,9% (!) | 50,1% (!) | 16,2% (-) | 83,8% (+) | 3,1% (-) | 96,9% (+) |
| 100 | 39,4% (-) | 60,6% (+) | 11,8% (-) | 88,2% (+) | 1,8% (-) | 98,2% (+) |
| 150 | 19,9% (-) | 80,1% (+) | 5,4% (-) | 94,6% (+) | 0,5% (-) | 99,5% (+) |
| 200 | 11,8% (-) | 88,2% (+) | 3,1% (-) | 96,9% (+) | 0,3% (-) | 99,7% (+) |
| 300 | 5,4% (-) | 94,6% (+) | 1,4% (-) | 98,6% (+) | 0,1% (-) | 99,9% (+) |

Примітка. (+) – висока ймовірність ураження (понад ~50%); (!) – середня ймовірність (близько 10–50%); (-) – дуже низька ймовірність (менше 10%).

Отримано результати, що підтверджують і фактично демонструють зв'язок розмірів об'єктів з успішністю виконання завдань з ураження, наприклад, ударних БпЛА з ГСНС, а також із прикриття засобами РЕБ – подавлення каналів ГСНС, наприклад, ударних БпЛА, за рахунок чого можна досягнути збільшення СКП.

Для того, щоб уражати об'єкт, потрібно зменшувати σ : для гарантованого ураження ($\geq 90\%$) цілі радіусом 100 м потрібно $\sigma \leq 47$ м; для цілі радіусом 50 м – ще менше, $\sigma \leq 23$ м.

Для того, щоб зберегти об'єкт, необхідно, навпаки, збільшувати σ : для цілі радіусом 100 м, у разі $\sigma \geq 200$ м, шанс збереження становить понад 88%; для цілі радіусом 50 м, якщо $\sigma \geq 100$ м, шанс збереження – понад 88%.

3. Для визначення потрібної СКП перетворюємо формули (1)–(2) та отримуємо

$$\sigma = \sqrt{\frac{R_{obj}^2}{2 \cdot \ln(1 - P_{\text{попад}})}} \quad (3)$$

Результати розрахунків (див. табл. 2) наведено для об'єктів $R_1 = 100$ м; $R_2 = 50$ м; $R_3 = 25$ м.

Таблиця 2

Зведена таблиця потрібних СКП, що забезпечують задані ймовірності
(для об'єктів $R_1 = 100$ м; $R_2 = 50$ м; $R_3 = 25$ м)

| $P_{\text{попад}}$ | $P_{\text{пром}}$ | $\ln(1 - P_{\text{попад}})$ | σ , м ($R_1 = 100$ м) | σ , м ($R_2 = 50$ м) | σ , м ($R_3 = 25$ м) |
|--------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0,1 | 0,9 | -0,105 | 218,0 | 109,0 | 54,5 |
| 0,3 | 0,7 | -0,357 | 118,0 | 59,0 | 29,5 |
| 0,5 | 0,5 | -0,693 | 85,0 | 42,5 | 21,2 |
| 0,7 | 0,3 | -1,204 | 64,4 | 32,2 | 16,1 |
| 0,9 | 0,1 | -2,303 | 47,0 | 23,5 | 11,8 |

Отримані дані підтверджують прогнозовані результати виконання завдань (як силами та засобами РЕБ, так і БпС) по заданих об'єктах. Реалізація таких можливостей потребує планування та виконання комплексу організаційно-технічних заходів і тактичних прийомів.

Дотримуємося концепції ефективності прикриття – цільової ідеї: застосування засобів РЕБ збільшує навігаційну похибку платформи у зоні подавлення (оскільки канали ГСНС не працюють, то вона функціонує за інерціальної складової). Тому, чим більший час у зоні та інтенсивніше подавлення, тим вищі значення показників відхилення (метрики) (див. табл. 2), тим меншою є ймовірність ураження та, відповідно, вищою ймовірність неураження (збереження об'єкта), тобто ефективніше прикриття.

Дослідження передбачає розроблення аналітичної (неопераційної) методики вимірювання того, наскільки РЕПр засобами РЕБ (подавлення ГСНС) збільшує за часом помилку $\sigma(t)$ порівняно з базовою σ_0 та підвищує ймовірність промаху або знижує точність наведення через навігаційні спотворення.

Крок (блок) 1. Розрахунок базової (вихідної) ймовірності промаху (без РЕБ):

$$P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0) = \exp\left(-\frac{R^2}{2 \cdot \sigma_0^2}\right), \quad (4)$$

де $P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0)$ – базова ймовірність промаху;

R – радіус цілі (зона ураження);

σ_0 – ізотропна СКП до подавлення.

Крок (блок) 2. Порівняння базової (вихідної) ймовірності промаху із цільовою (заданою, потрібною) ймовірністю промаху $P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$:

$P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0) \geq P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$ – додаткових заходів не потрібно;

$P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0) < P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$ – додаткові заходи РЕБ потрібні.

Крок (блок) 3. Приймаємо обмеження, що цільової (заданої, потрібної) ймовірності промаху $P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$ можна (потрібно) досягнути виконанням заходів РЕБ щодо своєчасного та достатнього за часом (t) подавлення каналів ГСНС, а помилка ІНС наведення БПЛА $\sigma(t)$ забезпечить досягнення $P_{\text{пром}}^{(\text{РЕБ})} \geq P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$.

Ймовірність промаху з РЕБ визначаємо в такій спосіб:

$$P_{\text{пром}}^{(\text{РЕБ})}(r, \sigma(t)) = \exp\left(-\frac{R^2}{2 \cdot \sigma^2(t)}\right), \quad (5)$$

де r – радіальна відстань, використовується як параметр для обрахунку області;

$\sigma(t)$ визначає обрану модель дрейфу ІНС (лінійна / дифузійна / поліноміальна).

Крок (блок) 4. Приймаємо, що модель дрейфу ІНС лінійна: $\sigma(t) = \sigma_0 + k \cdot t$ (може бути прийнята поліноміальна $\sigma(t) = \sqrt{\sigma_0^2 + \gamma \cdot t + \delta \cdot t^2}$, де k – коефіцієнт інтенсивності; γ – лінійний коефіцієнт зростання (зміни) дисперсії у часі t ; δ – квадратичний коефіцієнт прискорення зміни дисперсії). Тоді $\sigma^{(\text{потрібно})} = \sigma_0 + k \cdot t$, розраховуємо її за формулою

$$\sigma^{(\text{потрібно})} = \frac{R}{\sqrt{2 \cdot (-\ln P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})})}}. \quad (6)$$

Крок (блок) 5. Знаючи характеристики БПЛА (V) та його ІНС (σ_0, k), підставляємо у формулу для лінійної моделі дрейфу $k \cdot t = \sigma^{(\text{потрібно})} - \sigma_0$, тоді розраховуємо потрібний час $t = \frac{\sigma^{(\text{потрібно})} - \sigma_0}{k}$ і знайдемо $D \approx V \cdot t = R^{(\text{потрібно})}$ – радіус зони РПр, потрібну товщину кільця прикриття.

Крок (блок) 6. Розрахунок потрібної площі прикриття $S^{(\text{потрібно})} = \pi \cdot R^{(\text{потрібно})^2}$. Знаючи характеристики засобів РЕБ (площу зони відповідного засобу ($S^{(\text{РЕБ}1)}$), знайдемо потрібну кількість засобів РЕБ $N_{\text{РЕБ}} = \frac{S^{(\text{потрібно})}}{S^{(\text{РЕБ}1)}}$.

Крок (блок) 7. Визначаємо приріст ймовірності промаху: $\Delta P_{\text{пром}} = P_{\text{пром}}^{(\text{РЕБ})} - P_{\text{пром}}^{(0)}$.

Крок (блок) 8. Розраховуємо ефективність прикриття (узагальнено):

$$\varepsilon = \langle \Delta P_{\text{пром}} \rangle \cdot A \cdot C,$$

де A – показник доступності, який характеризує, наскільки реально можна застосувати засоби РЕБ у конкретному сценарії. Його можна визначити як частку часу працездатності, наприклад РЕБ ($T_{\text{пр}}$), у загальному часі сценарію ($T_{\text{сц}}$), що моделюється в такі фактори доступності: наявність потрібних систем у зоні операцій; технічна справність і готовність до роботи; логістичні та енергетичні обмеження; регуляторні чи командні дозволи на використання, а саме:

$$A = \frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{сц}}}.$$

Показник суцільності покриття зоною РПР потрібної площі земної поверхні C , що характеризує, наскільки рівномірно та безперервно зона дії засобів РЕБ охоплює простір (радіус, сектор, частотний діапазон), можна визначити як частку площі земної поверхні, на якій виконуються вимоги до енергетики сигналу (енергетики, кратності) засобів РЕБ ($S_{\text{нокр}}$) у заданій площі для покриття ($S_{\text{зад}}$):

$$C = \frac{S_{\text{нокр}}}{S_{\text{зад}}}.$$

Показник C моделюється у такі фактори суцільності: геометрія розташування засобів (радіус дії, перекриття зон); щільність сигналу та відсутність “мертвих зон”; стійкість до змін середовища.

Агрегація за сценаріями для узагальнення їх результатів (моделей, прогнозів чи варіантів розвитку подій) у єдину систему для отримання інтегрованої оцінки передбачає усереднення $\Delta P_{\text{пром}}$ за траєкторіями / курсами / швидкостями. При цьому необхідно зважати на доступність РЕБ (високий рівень A означає, що РЕБ можна швидко й ефективно застосувати; низький, що засоби є, але їх використання обмежене) та суцільність покриття (C).

Крок (блок) 9. Особа, що приймає рішення в тактичній ланці управління (разом із фахівцями РЕБ та БпС) проводить:

пошук можливих варіантів взаємного розташування елементів БпС, потрібного для виконання завдань з ураження, і зразків техніки РЕБ для РЕПр;

визначення потужностей сигналу ГСНС та перешкод на приймальних антенах БпЛА за технічними характеристиками відповідних передавачів і антенних систем;

розрахунок співвідношення сигналів каналів ГСНС та перешкод на приймальних антенах БпЛА (коефіцієнтів управління та подавлення);

встановлення можливості реалізації потрібних значень показників просторових характеристик БпС та зразка техніки РЕБ (РЕПр) шляхом порівняння отриманих коефіцієнтів управління та подавлення з урахуванням обов’язкових (визначених, потрібних, встановлених) для цього тактичного епізоду коефіцієнтів;

порогову перевірку: чи досягаємо цільового значення ймовірності (P_{miss} ; P_{hit}) або метрики у встановлених для прикриття зоні та часі, якщо ні, то потрібно коригувати D , R

(потужність / частотний план РЕБ) або накладати додаткові обмеження й розглядати песимістичні варіанти.

Слід зауважити, що потрібно врахувати такі примітки щодо коректності запропонованої моделі похибок навігації ударних БпС і застосування підходу до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта:

по-перше, ця модель є концептуальною, тобто абстрактним узагальненням поглядів авторів на предметну область сучасної збройної боротьби щодо навігаційного протиборства, а також своєрідним каркасом для подальшого моделювання й аналізу;

по-друге, коефіцієнти моделі потрібно брати з надійних даних щодо класу ІНС інерціальних вимірювальних пристроїв кожної платформи БпС, оскільки результати дуже чутливі до значень $\sigma_0, V, k, \gamma, \delta$;

по-третє, за межами цього дослідження залишаються питання анізотропії помилок ІНС, які характеризуються різними дисперсіями похибок за осями ($\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$), що пов'язано з конструктивними особливостями інерціальних вимірювальних пристроїв (різна чутливість акселерометрів та гіроскопів за осями). Це зумовлює необхідність розгляду поліноміальної моделі зростання похибки, значення якої можуть істотно відрізнятися від розрахованих за лінійною моделлю. Це, у свою чергу, потребує зважених рішень, коли вимоги до радіуса прикриття різко розходяться: лінійна модель дає нижній поріг (десятки кілометрів), а поліноміальна – верхню межу (сотні – тисячі кілометрів). Ця потреба спричиняє нову проблему: не створювати нереалістичні зони, а спроектувати стійке, гнучке (за сценарієм) прикриття;

по-четверте, траєкторний вплив критично важливий, оскільки час у зоні може різко змінюватися залежно від курсу та профілю швидкості, наприклад: ЗПН можуть атакувати об'єкт на більшій, ніж крейсерська, швидкості та з різким зменшенням висоти (БпЛА типу Shaded атакує об'єкт із такими значеннями: $V = 300$ км/год; $D = 1,5-3$ км; $H = 0,2-1$ км);

по-п'яте, цій підхід демонструє можливість оцінювання ефективності сил і засобів РЕБ та БпС із використанням імовірнісних метрик (імовірностей) влучання або промаху (збереження), що залежать від розмірів та якості зон прикриття об'єктів, і не містить інструкцій щодо застосування засобів або параметрів впливу.

Висновки. У результаті дослідження розроблено підхід до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта засобами РЕБ за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС, який може бути підґрунтям для розв'язання проблеми планування застосування таких засобів в умовах навігаційного протиборства.

Запропонований зміст оцінювання РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС відповідає оцінюванню протиставних можливостей засобів БпС та РЕБ в умовах навігаційної боротьби та не викривляє оперативного тактичного змісту бойових тактичних епізодів їх застосування в умовах різних сценаріїв. Його можна взяти за основу під час розроблення складних методик, які містять інструкційні положення з планування дій засобів (зразків, комплексів, систем), що розглядаються.

На думку авторів, запропонований матеріал може бути використаний фахівцями тактичного рівня, які безпосередньо застосовують засоби, що мають у складі компоненти

навігаційних систем, або борються з такими, а також проводять розрахунки (використовують результати), для виконання завдань РЕПр або ураження об'єктів.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Webb F. H. Error Analysis and Probability Models in Navigation Systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 412 p.
2. Papp Z., Rožnjik A. A Method for Approximating Circular Error Probable // Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_3
3. Zheng T., Xu A., Xu X., Liu M. Modeling and Compensation of Inertial Sensor Errors in Measurement Systems // Electronics. 2023. Vol. 12. 2458. <https://doi.org/10.3390/electronics12112458>
4. Karamat T. et al. Drift and Error Sources in Strapdown Inertial Navigation Systems // The Journal of Navigation. 2012. Vol. 65, Iss. 3. P. 421–438.
5. IEEE Standard for Inertial Sensor Performance Evaluation. IEEE Std 1293-2018. New York, 2018. 15 p. URL: <https://www.standards-global.com/wp-content/uploads/pdfs/preview/2015631> (last accessed: 05.02.2026).
6. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, Chris G. Bartone. Inertial Navigation Error Analysis // Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley, 2020. P. 419–459. <https://doi.org/10.1002/9781119547860.ch11>
7. GuideNav Consortium. INS Error Models and Practical Compensation Techniques. NATO Technical Report. Brussels : NATO, 2019. P. 20. URL: <https://guidenav.com/blog/error-sources-and-compensation-techniques-in-inertial-navigation-systems/> (last accessed: 01.03.2026).
8. Advances in INS drift modeling // IEEE Aerospace Conference Proceedings. New York : IEEE, 2021. P. 713. <https://www.proceedings.com/content/059/059160webtoc.pdf> (last accessed: 10.02.2026).
9. DJI Mavic 3 RTK User Manual. Shenzhen : DJI, 2024. P. 90. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3/202406UM/DJI_Mavic_3_User_Manual_v2.3_en.pdf (last accessed: 09.03.2026).
10. Accuracy of GNSS and RTK in Modern UAVs // Defense Express. Kyiv, 2024. URL: https://defence-ua.com/news/scho_daje_rosijanam_nova_sistema_navigatsiji_v_shahedah_i_chi_oznachaje_tse_bezporadnist_reb-17202.html (last accessed: 15.02.2026).
11. GNSS Vulnerabilities and RTK Applications in UAVs // NV. Kyiv, 2024. URL: <https://english.nv.ua/nation/defense-express-debunks-russian-claims-about-upgraded-unstoppable-shahed-drones-50514896.html> (last accessed: 09.03.2026).
12. DJI Enterprise. RTK Technology in Civil and Military UAVs. Shenzhen : DJI, 2024. URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk> (last accessed: 06.02.2026).
13. Electronic Warfare Doctrine and Standards. NATO STANAG 4624. Brussels : NATO Standardization Office, 2020. 115 p. URL: https://edocs.nps.edu/dodpubs/topic/jointpubs/JP3/JP3_13_1_070125.pdf (last accessed: 01.03.2026).

14. ISO/IEC 18305:2021. Test Methods for Navigation and Positioning Performance. Geneva : International Organization for Standardization, 2021. 15 p. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62090/5fe82bb92ecd49bea5144798971e7824/ISO-IEC-18305-2016.pdf> (last accessed: 02.02.2026).
15. Performance Testing of Positioning, Navigation, and Timing Systems. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2022. 85 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=9304974> (last accessed: 05.02.2026).
16. Як працює РЕБ: принципи, механізми та бойове застосування. URL: <https://www.fair.org.ua/yak-praczyuye-reb-pryncypy-mehanizmy-ta-bojove-zastosuvannya/> (дата звернення: 05.03.2026).
17. Іщенко Д. А., Стрінада В. В. Формування задуму ударного безпілотного авіаційного комплексу з урахуванням прогнозованого радіоелектронного прикриття об'єкта від ударів із повітря // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 28 (I). С. 177–189. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.15>
18. Михайленко С. В., Свіцова Є. В., Янцевич А. А Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. 2-ге вид., випр. Харків : Вид-во НУА, 2022. 180 с.
19. Костюк О. В., Костюк В. О. Теорія похибок та обробка результатів вимірювань. Київ : КНУ, 2018. 312 с.

Стаття надійшла до редакції 30.04.2026.

Прийнято до друку 15.05.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Webb, F. H. (2012). *Error Analysis and Probability Models in Navigation Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
2. Papp, Z., & Rožnjik, A. A (n. d.). Method for Approximating Circular Error Probable. *Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_3
3. Zheng, T., Xu, A., Xu, X., & Liu, M. (2023). Modeling and Compensation of Inertial Sensor Errors in Measurement Systems. *Electronics*, 12, 2458. <https://doi.org/10.3390/electronics12112458>
4. Karamat, T., et al. (2012). Drift and Error Sources in Strapdown Inertial Navigation Systems. *The Journal of Navigation*, 65, 3, 421–438.
5. *IEEE Standard for Inertial Sensor Performance Evaluation. IEEE Std 1293-2018*. (2018). New York Retrieved from <https://www.standards-global.com/wp-content/uploads/pdfs/preview/2015631>
6. Mohinder, S. Grewal, Angus, P. Andrews, & Chris, G. Bartone. (2020). Inertial Navigation Error Analysis. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119547860.ch11>

7. *GuideNav Consortium. INS Error Models and Practical Compensation Techniques. NATO Technical Report.* (2019). Brussels: NATO. Retrived from <https://guidenav.com/blog/error-sources-and-compensation-techniques-in-inertial-navigation-systems/>
8. *Advances in INS Drift Modeling.* (2021). In *IEEE Aerospace Conference Proceedings.* New York. Retrived from <https://www.proceedings.com/content/059/059160webtoc.pdf>
9. *DJI Mavic 3 RTK User Manual.* (2024). Shenzhen. Retrived from https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3/202406UM/DJI_Mavic_3_User_Manual_v2.3_en.pdf
10. *Accuracy of GNSS and RTK in Modern UAVs.* (2024). *Defense Express.* Kyiv. Retrived from https://defence-ua.com/news/scho_daje_rosijanam_nova_sistema_navigatsiji_v_shahedah_i_chi_oznachaje_tse_bezporadnist_reb-17202.html
11. *GNSS Vulnerabilities and RTK Applications in UAVs.* (2024). Kyiv. Retrived from <https://english.nv.ua/nation/defense-express-debunks-russian-claims-about-upgraded-unstoppable-shahed-drones-50514896.html>
12. *DJI Enterprise. RTK Technology in Civil and Military UAVs.* (2024). Shenzhen. Retrived from <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk>
13. *Electronic Warfare Doctrine and Standards. NATO STANAG 4624.* (2020). Brussels: NATO Standardization Office. Retrived from https://edocs.nps.edu/dodpubs/topic/jointpubs/JP3/JP3_13_1_070125.pdf
14. *ISO/IEC 18305:2021. Test Methods for Navigation and Positioning Performance.* (2021). Geneva: International Organization for Standardization. Retrived from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62090/5fe82bb92ecd49bea5144798971e7824/ISO-IEC-18305-2016.pdf>
15. *Performance Testing of Positioning, Navigation, and Timing Systems.* (2022). Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. Retrived from <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=9304974>
16. *Yak pratsiue REB: pryntsyty, mekhanizmy ta boiove zastosuvannia [How Electronic Warfare Works: Principles, Mechanisms and Combat Applications].* (n. d.). <https://www.fair.org.ua/yak-praczyuyue-reb-prynczypy-mehanizmy-ta-bojove-zastosuvannya/> [in Ukrainian].
17. *Ishchenko, D. A., Strinada, V. V. (2025). Formuvannia zadumu udarnoho BpAK z urakhuvanniam prohnzovanoho radioelektronnoho prykryttia obiekta vid udariv iz povitria [Forming the Concept of Strike Unmanned Aerial Complex Taking into Account the Forecasted Radioelectronic Coverage of the Object from Air Strikes]. Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute], 28 (I), 177–189. https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.15 Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].*
18. *Mykhailenko, S. V., Svishchova, Ye. V., & Yantsevych, A. A. (2022). Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka: navch. posib. [Probability Theory and Mathematical Statistics: textbook].* Kharkiv [in Ukrainian].
19. *Kostiuk, O. V., & Kostiuk, V. O. (2018). Teoriia pokhybok ta obrobka rezultativ vymiriuvan [Error Theory and Processing of Measurement Results].* Kyiv [in Ukrainian].

D. A. Ishchenko, V. V. Strinada

APPROACH TO ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF RADIO-ELECTRONIC COVERAGE OF AN OBJECT BASED ON A CONCEPTUAL MODEL OF NAVIGATION ERRORS IN STRIKE DRONE SYSTEMS

The article examines the effectiveness of electronic countermeasures for an object, carried out using electronic warfare tools, as a measure of how much they reduce the effectiveness of strikes by unmanned systems. This is considered as the degree to which these systems can execute precision strikes on targets. These capabilities of unmanned systems directly depend on the use of various navigation systems, primarily inertial ones. Unmanned systems operate autonomously, but they are integrated with navigation systems that work with external sources of navigation information. Maintaining guidance accuracy involves periodically correcting the data of inertial navigation systems with information obtained from onboard radio-electronic equipment of global satellite navigation system channels. If such correction isn't possible, the number of errors in determining the vehicle's own location and their changes over time increases, which worsens the navigation of unmanned systems when targeting programmed objects. An increase in the root mean square errors in the navigation systems of unmanned vehicles, proportional to the duration of global satellite navigation system channel jamming, reduces the likelihood of hitting the target and, accordingly, their effectiveness.

In modern combat operations, the widespread use of unmanned systems creates complex challenges for electronic warfare forces and equipment, particularly when it comes to jamming the channels of global satellite navigation systems for air attack assets. A conceptual model of navigation errors has been proposed, combining classic accuracy metrics (circular error probable and root mean square error in distance) with practical models of inertial navigation system error growth under the influence of electronic warfare tools and interference on the onboard electronic systems of global satellite navigation channels for air attack assets. This approach allows evaluating the effectiveness of an object's electronic shielding not just based on error parameters, but also on indicators determined by electronic warfare factors. It makes it possible to adapt the assessment system to real conditions and provides a basis for multi-level resource planning in a system that counters drone threats.

Keywords: *unmanned system; global satellite navigation system; inertial navigation system; air strike means; navigation system; circular probable deviation; navigation error; root mean square deviation; electronic warfare; effectiveness of cover.*

Ю. Л. Бондаренко, канд. техн. наук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>

І. А. Іщенко

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0007-7150-1653>

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНА РОЗВІДУВАЛЬНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА І КЛАСУ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ

У статті наведено результати аналізу режимів роботи електродвигуна розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу на основі телеметричних tlog-файлів, отриманих під час виконання польотів у зоні ведення бойових дій. Дослідження виконано на основі вибірки з 450 польотних журналів формату tlog, що забезпечує репрезентативність результатів та дозволяє оцінити реальні умови експлуатації безпілотних літальних апаратів. Основну увагу приділено оцінюванню рівномірності швидкості польоту.

Для оброблення телеметричних даних було розроблено спеціалізований програмний продукт tlog3, який забезпечує автоматизовану фільтрацію даних, формування узгоджених часових рядів параметрів польоту, згладжування випадкових шумів та побудову графіків зміни швидкості, сигналів керування й електричних параметрів силової установки. Для підвищення достовірності оцінювання в роботі застосовано критерій визначення рівномірності польоту, що ґрунтується на обмеженні відносної зміни швидкості між сусідніми вибірками телеметричних даних, із використанням ковзного середнього.

На основі аналізу отриманих графіків визначено структуру режимів польоту безпілотних літальних апаратів, зокрема частку часу перебування в режимах максимальної швидкості, усталеного (рівномірного) польоту та перехідних процесів. Встановлено, що значна частина польоту характеризується кусково-лінійною зміною швидкості, що створює передумови для оптимізації алгоритмів керування тягою електродвигуна.

Визначено основні фактори, що зумовлюють нерівномірність польоту, серед яких ключову роль відіграють маневрування безпілотних літальних апаратів, вплив атмосферних збурень та особливості роботи системи автоматичного керування. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення алгоритмів керування електродвигуном та підвищення енергоефективності розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу в умовах реальної експлуатації.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; телеметрія; електродвигун; режим польоту; енергоефективність; автопілот.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Безпілотні літальні апарати (БпЛА) I класу широко застосовують для виконання розвідувальних завдань у сучасних умовах ведення бойових дій. Одним із ключових показників ефективності таких систем є тривалість перебування в повітрі, яка визначає можливості проведення повітряної розвідки та спостереження.

Для БпЛА з електричною силовою установкою тривалість польоту безпосередньо залежить від енергетичних характеристик акумуляторної батареї та ефективності використання електричної енергії. Значну роль у цьому процесі відіграє режим роботи електродвигуна, який визначається алгоритмами керування автопілота та умовами виконання польоту.

Особливістю застосування розвідувальних БпЛА у зоні ведення бойових дій є складний характер траєкторії польоту, що включає численні маневри, зміну швидкості та висоти, а також вплив поривів вітру та турбулентності атмосфери. У результаті цього силова установка БпЛА працює в змінних режимах, що призводить до виникнення перехідних процесів у роботі електродвигуна.

Для підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів БпЛА необхідним є дослідження реальних режимів роботи силової установки на основі аналізу телеметричних даних польоту. Такі дослідження дозволяють визначити характерні режими польоту, оцінити частку часу перебування БпЛА у стабільних та перехідних режимах, а також встановити фактори, що призводять до зниження енергоефективності польоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері БпЛА спрямовані на підвищення ефективності їх функціонування за рахунок удосконалення енергетичних систем, алгоритмів керування та методів оброблення телеметричної інформації. Особливе місце займає аналіз польотних телеметричних файлів формату tlog, які містять дані про режими роботи бортових систем, параметри руху та енергоспоживання.

У роботах [1, 2] показано, що розвиток БпЛА охоплює задачі керування, зв'язку, енергозабезпечення та оброблення даних.

Аналіз телеметричних даних є важливим етапом дослідження роботи БпЛА. У публікаціях [3, 4] розглянуто протокол MAVLink, що використовується в автопілотах ArduPilot та PX4. Показано, що телеметричні дані мають складну структуру та нерівномірну частоту надходження, що ускладнює їх оброблення.

У дослідженнях [5–7] розглянуто питання енергетичної ефективності БпЛА, зокрема з'ясовано, що обмеженість енергетичних ресурсів є одним із ключових факторів, що визначають тривалість польоту та ефективність виконання місій. Основні підходи включають оптимізацію траєкторії, управління ресурсами та розроблення енергоефективних алгоритмів зв'язку.

Статті [8, 9] присвячені процесам збирання та оброблення даних БпЛА. Встановлено, що телеметричні дані характеризуються нерівномірністю надходження, наявністю пропусків та шумів, що потребує застосування спеціальних методів попереднього оброблення, зокрема фільтрації та синхронізації.

У публікаціях [10–12] розглянуто застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу даних БпЛА. Встановлено, що використання великих

масивів телеметричних та сенсорних даних дозволяє вирішувати завдання класифікації, прогнозування та виявлення аномалій, однак такі підходи є обчислювально складними та не завжди придатними для оперативного аналізу.

У роботах [13–15] досліджено питання надійності та безпеки телеметричних систем, зокрема показано, що протокол MAVLink має низку вразливостей, що може призводити до перехоплення або модифікації даних, а отже, впливати на достовірність аналізу телеметрії.

У вітчизняних працях [16–18] розглянуто застосування БПЛА у військовій сфері. З'ясовано, що експлуатація здійснюється в умовах обмежених ресурсів та впливу завад, що потребує адаптації комерційних платформ. Водночас аналіз телеметричних даних реальних польотів у цих роботах висвітлено обмежено.

Отже, аналіз наукових джерел свідчить, що відомі підходи до дослідження режимів роботи БПЛА базуються переважно на теоретичних моделях або обмежених експериментальних даних. При цьому відсутні комплексні дослідження, які враховують великі масиви телеметричних tlog-файлів, отриманих у реальних, зокрема бойових, умовах експлуатації.

Формулювання завдання дослідження. Наукова новизна цього дослідження полягає у використанні масиву реальних польотних даних значного обсягу для виявлення статистичних закономірностей режимів роботи електродвигуна БПЛА, встановленні взаємозв'язків між сигналами керування автопілота та параметрами споживання струму двигуном, а також у формуванні критеріїв оцінювання рівномірності польоту, що дозволяє перейти від модельних оцінок до аналізу реальної експлуатації системи.

Метою статті є аналіз режимів роботи електродвигуна розвідувального БПЛА I класу на основі телеметричних tlog-файлів, отриманих під час виконання реальних бойових завдань у зоні ведення бойових дій, та визначення характерних ознак усталених і перехідних режимів для формування напрямів удосконалення алгоритмів автопілота та підвищення енергоефективності.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу режимів роботи електродвигуна розвідувального БПЛА I класу використано телеметричні файли формату tlog, отримані під час виконання реальних бойових завдань у зоні ведення бойових дій. Вони формуються автопілотом у процесі польоту та містять часові послідовності параметрів навігації, стану систем, команд керування та даних електроживлення.

Для оцінювання режимів роботи силової установки та витрат енергії виконано аналіз трьох взаємопов'язаних параметрів:

- швидкості польоту;
- команди автопілота на електродвигун / регулятор;
- струму споживання.

Окремо зазначимо, що за наявною інформацією знижень напруги акумуляторної батареї не спостерігалось, отже, основні коливання струму та швидкості зумовлені не деградацією живлення, а режимами керування та умовами польоту.

Для оброблення телеметричних журналів польоту було розроблено спеціалізований програмний інструмент tlog3 на мові Python (рис. 1).

Програма дозволяє проводити: автоматизований імпорт телеметричних файлів формату tlog; експорт обраних параметрів у CSV для подальшого поглибленого аналізу; фільтрацію та згладжування даних; побудову графіків основних параметрів польоту. Її використання надає можливість об'єднати дані з різних типів повідомлень MAVLink у єдиний часовий ряд, що є необхідним для подальшого коректного оцінювання взаємозв'язку між командою автопілота, фактичною швидкістю та споживаним струмом.

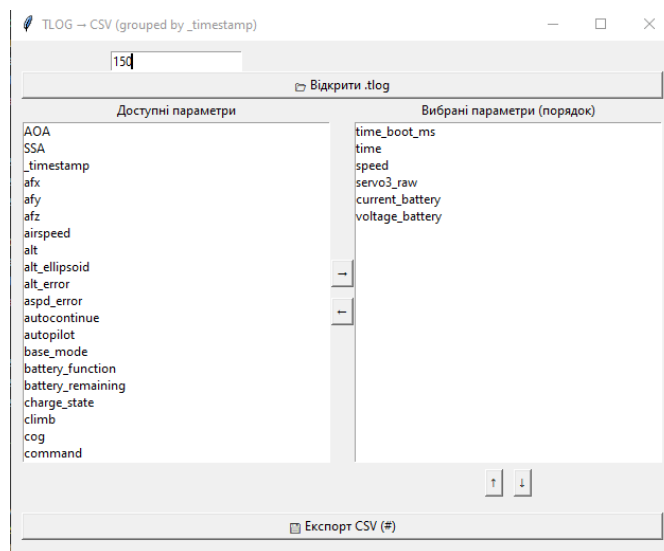


Рис. 1. Інтерфейс програмного інструмента tlog3

У процесі аналізу телеметричних даних формату .tlog враховано їх характерні особливості: нерівномірну частоту надходження повідомлень, наявність пропусків (NaN), службових значень, а також ділянок до запуску двигуна. Для усунення впливу цих факторів застосовано процедуру фільтрації та нормалізації даних. Зокрема, службові значення типу 65534 та 65535, що не мають фізичного змісту, замінено на пропущені (None) з подальшим обробленням як NaN.

Для виділення ділянки активної роботи двигуна використано параметр `servo3_raw`, який відповідає сигналу керування (PWM). Із аналізу даних tlog-файлів виявлено, що значення 1000 відповідає мінімальному рівню (двигун неактивний), а перевищення цього порогу — початку роботи електродвигуна. Відповідно, з аналізу виключалися всі записи до першого моменту, коли `servo3_raw > 1000`, а значення було коректним. Це дозволило усунути вплив передстартових режимів.

Для зменшення обсягу даних застосовано прорідження (downsampling) із використанням параметра `divider`, що визначає крок вибірки. Такий підхід забезпечує баланс між швидкістю оброблення та деталізацією аналізу.

Формування часової шкали здійснювалося на основі параметра `time_boot_ms` із приведенням до відносного часу від початку запису та масштабуванням відповідно до обраного кроку дискретизації.

Для зменшення впливу випадкових коливань і шумів вимірювань застосовано метод ковзного середнього, який дозволяє виділити постійну усереднену складову сигналу та підвищити достовірність визначення режимів роботи електродвигуна. Для дискретного сигналу ковзне середнє визначається як

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{i-k},$$

де \bar{x}_i – значення параметра в момент часу;

N – розмір вікна усереднення;

k – індекс підсумовування, що визначає зміщення від поточного моменту часу й у межах вікна усереднення.

Вибір параметра N здійснювався з урахуванням частоти дискретизації телеметричних даних та характерної тривалості перехідних процесів. Під час аналізу масиву телеметричних даних було виявлено, що для значення $N = 5$ забезпечується ефективно пригнічення високочастотного шуму в разі збереження інформативності змін, пов'язаних із маневруванням та роботою автопілота.

Для оцінювання режимів польоту ключовим показником є рівномірність зміни швидкості. Визначення рівномірного польоту прийнято таким:

$$\Delta(t_i) = \frac{|V(t_i) - V(t_{i-1})|}{V(t_{i-1})} \cdot 100\%,$$

де $\Delta(t_i)$ – відносна зміна швидкості між сусідніми відліками;

$V(t_i)$ – швидкість польоту в поточній вибірці;

$V(t_{i-1})$ – швидкість польоту в попередній вибірці.

Політ вважається рівномірним, якщо швидкість або практично не змінюється, або змінюється рівномірно, а приріст швидкості відносно попереднього проміжку вибірки не перевищує 5%:

якщо $\Delta(t) \leq 5\%$, то відповідна ділянка належить до усталеного (рівномірного) режиму;

якщо $\Delta(t) > 5\%$, то ділянка класифікується як перехідний процес / нерівномірний режим.

Вибір порогового значення 5% обґрунтовано як з погляду теорії оброблення сигналів, так і на основі аналізу експериментальних телеметричних даних, за якого цей критерій забезпечує найбільш адекватне відокремлення усталених ділянок польоту від перехідних процесів. Це дозволяє:

оцінити відповідність між командою та реакцією системи (динаміку регулювання);

виявити ділянки, де автопілот виконує часті корекції;

пов'язати перехідні процеси зі зміною струму, що прямо впливає на витрати енергії.

У ході дослідження проаналізовано 450 графіків польотів (профілів), отриманих з log-файлів формату .tlog.

За результатами аналізу з'ясовано, що середній відсоток рівномірності польоту за вибіркою становить близько 76,8%, що підтверджує домінування усталених режимів у загальній структурі польоту.

Водночас виявлено значну варіативність режимів польоту БПЛА: від майже з повністю стабільним швидкісним профілем (90–97% рівномірності) до випадків із помітною кількістю перехідних процесів (нижче 70%).

Для систематизації результатів виконано поділ графіків на три групи (класи режимів) залежно від частки часу рівномірного польоту.

Група А з високою рівномірністю ($\geq 90\%$) характеризується переважанням усталеного режиму польоту. Команда автопілота змінюється плавно або є квазіпостійною. Струм стабільний, без різких піків (рис. 2). Для кожного польоту побудовано графіки, що містять три основні криві:

- синю – команда автопілота на двигун (сигнал керування);
- червону – швидкість польоту (фактичний результат керування);
- зелену – струм споживання (реальне енергетичне навантаження).

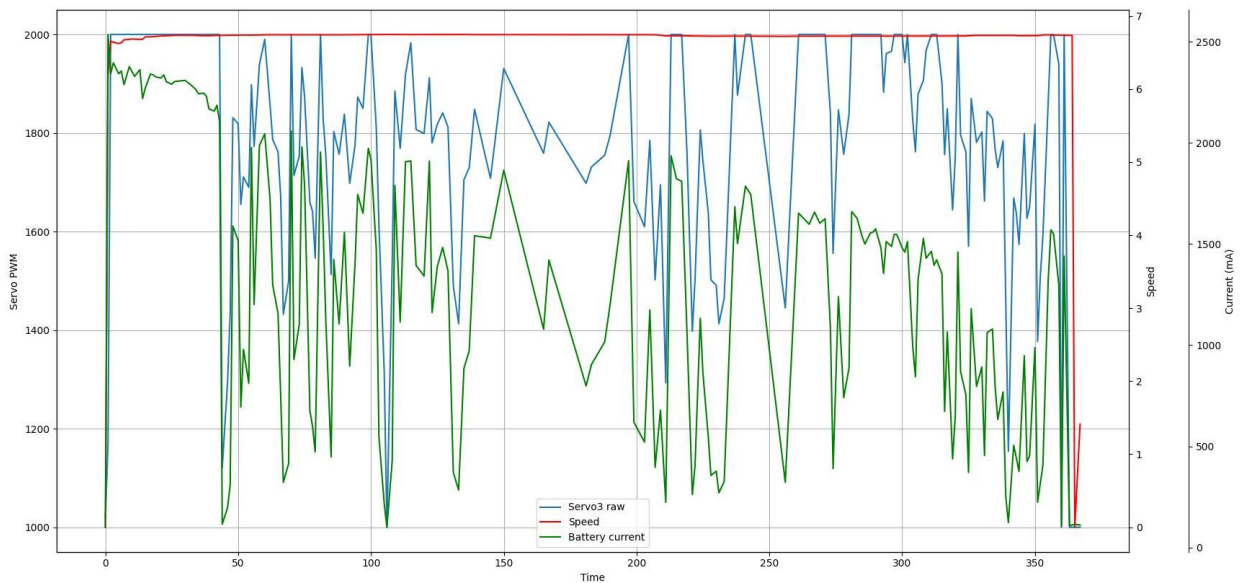
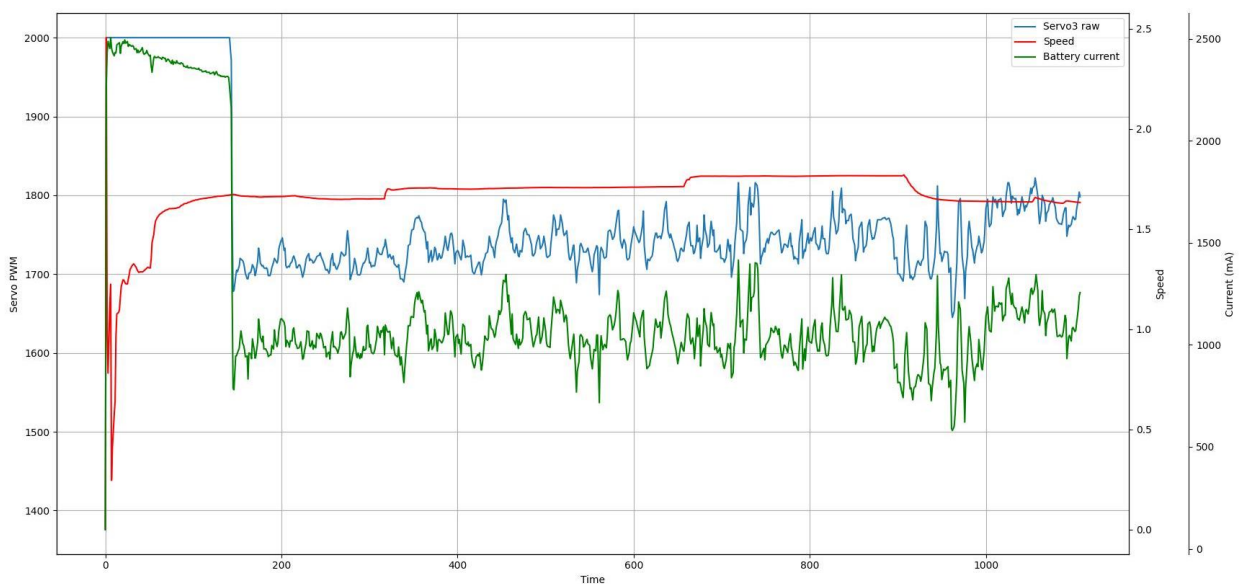


Рис. 2. Усталений крейсерський режим (група А)

Група В із середньою рівномірністю (80–89%) характеризується польотом переважно в усталеному режимі, але присутні короткі перехідні ділянки: корекція курсу, невеликі зміни висоти, реакція на пориви вітру, уточнення маршруту (рис. 3).



Рису. 3. Робочий режим із корекціями (група В)

Для групи С із низькою рівномірністю (< 80%) відмічається значна частка перехідних процесів. Команда автопілота має часті зміни, струм проявляє підвищену коливальність або пікові значення. Швидкість має хвилеподібний або ступінчастий характер (рис. 4).

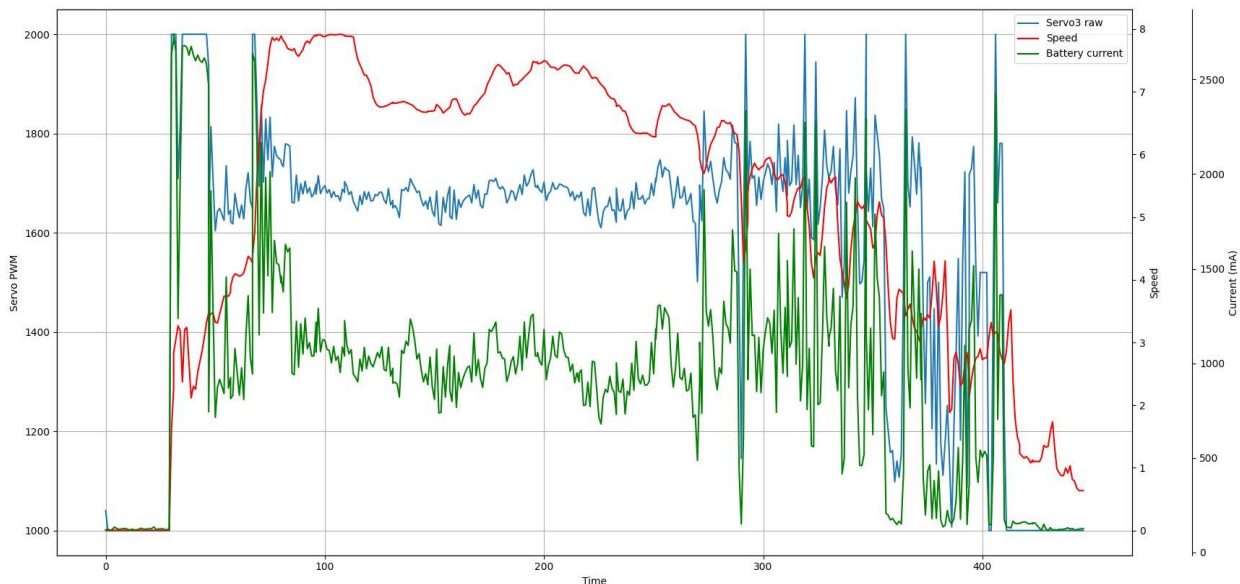


Рис. 4. Домінування перехідних процесів (група С)

Отримані результати свідчать, що коливання швидкості польоту та струму споживання формуються під впливом поєднання кількох факторів, серед яких ключову роль відіграють зовнішні аеродинамічні збурення, особливості виконання бойового завдання та характеристики алгоритмів керування автопілота.

У реальних умовах експлуатації БпЛА суттєвий вплив на характер швидкісного профілю польоту мають зовнішні аеродинамічні збурення, зокрема пориви зустрічного або бокового вітру, а також турбулентність атмосфери, яка може виникати внаслідок особливостей рельєфу місцевості або змін температурної стратифікації повітря. Такі збурення призводять до короточасних змін аеродинамічного навантаження на літальний апарат, що, у свою чергу, викликає реакцію системи керування у вигляді корекцій тяги. У телеметричних даних це проявляється у вигляді хвилеподібних або ступінчастих змін швидкості польоту та відповідних коливань струму електродвигуна.

Ще одним важливим фактором нерівномірності польоту є необхідність виконання маневрів, пов'язаних із реалізацією польотного або бойового завдання. У процесі виконання місії безпілотний літальний апарат може здійснювати корекцію маршруту, зміну висоти, розвороти або інші маневри, спрямовані на уточнення траєкторії польоту чи уникнення потенційних загроз. Такі дії неминуче супроводжуються перехідними процесами в роботі силової установки, що проявляється у зміні швидкості польоту та збільшенні варіативності струму споживання.

Одним із важливих факторів, що впливає на рівномірність польоту, є особливості роботи системи автоматичного керування. Аналіз графіків сигналу керування автопілота показує, що в окремих випадках команда на електродвигун змінюється з підвищеною частотою навіть за відносно незначного коливання швидкості польоту. Це може бути

зумовлено надто чутливими налаштуваннями контурів регулювання, зокрема параметрів регулятора швидкості або тяги, а також недостатнім згладжуванням вимірювань швидкості. У таких умовах навіть незначні відхилення швидкості можуть призводити до повторних корекцій сигналу керування, що проявляється у вигляді коливань тяги електродвигуна та відповідних змін струму споживання.

Окрім цього, певну роль відіграють динамічні властивості самої силової установки, яка включає електродвигун, електронний регулятор швидкості та повітряний гвинт. Реакція цієї системи на зміну сигналу керування має певну інерційність, що може призводити до короточасних перехідних процесів під час зміни режимів роботи. Особливості алгоритмів керування електронного регулятора швидкості, а також відповідність характеристик гвинта робочим режимам польоту також можуть впливати на характер зміни струму та тяги.

Отже, результати аналізу телеметричних даних свідчать, що нерівномірність польоту розвідувального БпЛА I класу має багатофакторну природу. Найбільш імовірними джерелами її виникнення є реакція системи автоматичного керування на зовнішні аеродинамічні збурення, маневри, необхідні для виконання бойового завдання, а також особливості налаштування алгоритмів керування тягою. Сукупна дія зазначених факторів призводить до виникнення перехідних процесів у роботі силової установки, що проявляється у вигляді коливань швидкості польоту та струму споживання електродвигуна.

Висновки. У ході дослідження проведено аналіз телеметричних даних 450 польотів розвідувального БпЛА I класу, отриманих у вигляді журналів формату .tlog. На основі вивчення змін швидкості польоту, сигналу керування автопілота та струму споживання електродвигуна виконано класифікацію режимів роботи силової установки за характером їх зміни й визначено частку рівномірного польоту в загальній структурі польотного профілю.

Встановлено, що режими роботи електродвигуна розвідувальних БпЛА I класу мають чітко виражену структуру та можуть бути класифіковані за характером зміни швидкості польоту, сигналу керування автопілота та струму споживання.

З'ясовано, що переважну частину польотного часу займають усталені режими, для яких характерна незначна або плавна зміна швидкості. Середнє значення частки рівномірного польоту становить близько 76,8%, що свідчить про домінування квазіусталених режимів у його структурі та створює передумови для підвищення енергоефективності на цих ділянках.

Показано, що перехідні режими супроводжуються підвищеними коливаннями струму електродвигуна та змінами швидкості польоту, а це потенційно може призводити до зниження енергоефективності силової установки.

Виявлено узгоджену реакцію на сигнали керування від автопілота на струм споживання та швидкість польоту, що підтверджує взаємозв'язок між алгоритмами керування тягою та енергетичними характеристиками польоту.

Проведений аналіз показав, що рівномірність польоту змінюється орієнтовно в діапазоні від 60% до 97%, що свідчить про значну варіативність режимів експлуатації БпЛА залежно від особливостей виконання місії та впливу зовнішніх аеродинамічних збурень.

Встановлено, що в більшості випадків швидкісний профіль польоту та сигнали керування можуть бути апроксимовані кусково-лінійними залежностями, що створює передумови для розроблення методів оптимізації енергоспоживання на окремих ділянках польоту.

Отримані результати свідчать про доцільність удосконалення алгоритмів автопілота шляхом зменшення високочастотних корекцій сигналів керування у крейсерському режимі, впровадження адаптивних методів реагування на зовнішні збурення та оптимізації переходів між режимами польоту.

Крім того, вони підтверджують, що аналіз телеметричних файлів формату .tlog є ефективним інструментом для оцінювання режимів роботи електродвигуна розвідувального БПЛА I класу в умовах реальної експлуатації та може бути використаний для подальшого вдосконалення алгоритмів керування автопілота.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні на основі аналізу телеметричних .tlog-файлів реальних польотів закономірностей зміни швидкості польоту, сигналу керування автопілота та струму електродвигуна, а також у виявленні кусково-лінійного характеру швидкісних режимів, що створює передумови для оптимізації алгоритмів керування тягою БПЛА.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення багатofакторних моделей, що враховують взаємозв'язок режимів польоту, параметрів керування та енергоспоживання, для створення адаптивних систем керування електроприводом БПЛА, здатних підвищувати ефективність їх функціонування в реальних умовах експлуатації.

Розглянемо можливі шляхи підвищення енергоефективності БПЛА.

1. Для оптимізації керування тягою на квазіусталених (крейсерських) ділянках польоту доцільно мінімізувати високочастотні корекції тяги електродвигуна. Це може бути реалізовано шляхом згладжування команд автопілота та введення «мертвої зони» за швидкістю, коли за малих її відхилень команда тяги не змінюється. Такий підхід дозволяє зменшити пульсації струму електродвигуна, стабілізувати режим роботи силової установки та знизити енергетичні втрати.

2. Оскільки в реальних умовах значний вплив на політ БПЛА мають пориви вітру та атмосферна турбулентність, то для підвищення енергоефективності доцільним також є використання адаптивних алгоритмів керування, які допускають більшу похибку швидкості польоту без формування різких коригувальних команд. Такий підхід дозволяє уникнути надмірних змін тяги у відповідь на короткочасні збурення та зменшити кількість непотрібних перехідних процесів.

3. Оптимізація переходів між режимами польоту. Під час виконання бойових завдань перехідні режими польоту (набір висоти, зниження, розвороти, корекція маршруту) є неминучими. Для зменшення їх енергетичної вартості доцільно обмежувати швидкість зміни сигналу керування електродвигуна, а також використовувати елементи прогнозування профілю польоту, що дозволяє підготувати силову установку до маневру заздалегідь і зменшити величину перехідних процесів.

Реалізація наведених рекомендацій може сприяти збільшенню частки квазіусталених режимів польоту БПЛА, зменшенню коливань струму електродвигуна та підвищенню його енергоефективності.

1. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on UAVs / K. Telli, O. Kraa, Y. Himeur et al. // *Systems*. 2023. Vol. 11, No. 8. P. 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
2. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges / H. Shakhathreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha et al. // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
3. Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey / A. Koubaa et al. // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>
4. MAVLink Protocol Analysis and Applications / A. Allouch et al. // *ArXiv*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.10641>
5. Fotouhi A., Moghaddam M. N., Zadeh M. K. Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1323. <https://doi.org/10.3390/s21041323>
6. Zeng Y., Zhang R. Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017. Vol. 16, No. 6. P. 3747–3760. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>
7. A Survey of Energy Efficient Methods for UAV communication / H. Jin, X. Jin, Y. Zhou et al. // *Vehicular Communications*. 2023. Vol. 41. P. 100594. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100594>
8. A Survey of UAV-Based Data Collection: Challenges, Solutions and Future Perspectives / K. Messaoudi, O. S. Oubbati, A. Rachedi et al. // *Journal of Network and Computer Applications*. 2023. Vol. 216. P. 103670. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103670>
9. Vasylenko M. P., Karpyuk I. S. Telemetry System of Unmanned Aerial Vehicles // *Electronics and Control Systems*. 2018. No. 4. P. 32–38. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.57.13244>
10. A Review on Deep Learning in UAV Remote Sensing / L. P. Osco, M. S. Arruda, J. Marcato Junior et al. // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 9. P. 1–36. <https://doi.org/10.3390/rs13091709>
11. A Survey on Energy Optimization Techniques in UAV-Based Cellular Networks: From Conventional to Machine Learning Approaches / A. I. Abubakar, I. Ahmad, K. G. Omeke et al. // *Drones*. 2023. Vol. 7, No. 3. P. 214. <https://doi.org/10.3390/drones7030214>
12. Reis M. J., Reis A. J. Edge-Based Real-Time Fault Detection in UAV Systems via B-Spline Telemetry Reconstruction and Lightweight Hybrid AI // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 16. P. 4944. <https://doi.org/10.3390/s25164944>
13. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for UAV Systems / A. Allouch et al. // *ArXiv*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.00265>
14. Security Analysis of Drone Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations / J.-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman., A. Chehab // *Internet of Things*. 2020. Vol. 11. P. 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
15. Lin W., Huang C. Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs // *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 11. P. 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>

16. Коваль В. В., Шмельов В. О. Аналіз застосування БПЛА у сучасних збройних конфліктах // Наука і оборона. 2022. № 3. С. 5–22.
17. Методичні рекомендації щодо застосування безпілотних авіаційних комплексів у Збройних Силах України. Київ : МОУ, 2023. 120 с.
18. Бондаренко Ю. Л., Іщенко І. А. Аналіз систем живлення електродвигунів розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 29. С. 107–124. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.08>

Стаття надійшла до редакції 04.05.2026.

Прийнято до друку 20.05.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Telli, K., Kraa, O., & Himeur, Y. et al. (2023). A Comprehensive Review of Recent Research Trends on UAVs. *Systems*, 11, 8, 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
2. Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., & Al-Fuqaha, A. et al. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
3. Koubaa, A. et al. (2019). Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey. *IEEE Access*, 7, 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>
4. Allouch, A. et al. (2019). MAVLink Protocol Analysis and Applications. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.10641>
5. Fotouhi, A., Moghaddam, M. N., & Zadeh, M. K. (2021). Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review. *Sensors*, 21, 4, 1323. <https://doi.org/10.3390/s21041323>
6. Zeng, Y., & Zhang, R. (2017). Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 6, 3747–3760. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>
7. Jin, H., Jin, X., & Zhou, Y. et al. (2023). A Survey of Energy Efficient Methods for UAV communication. *Vehicular Communications*, 41, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100594>
8. Messaoudi, K., Oubbati, O. S., & Rachedi, A. et al. (2023). A Survey of UAV-Based Data Collection: Challenges, Solutions and Future Perspectives. *Journal of Network and Computer Applications*, 216, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103670>
9. Vasylenko, M. P., & Karpyuk, I. S. (2018). Telemetry System of Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics and Control Systems*, 4, 32–38. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.57.13244>
10. Osco, L. P., Arruda, M. S., & Marcato Junior, J. et al. (2021). A Review on Deep Learning in UAV Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13, 9, 1–36. <https://doi.org/10.3390/rs13091709>
11. Abubakar, A. I., Ahmad, I., & Omeke, K. G. et al. (2023). A Survey on Energy Optimization Techniques in UAV-Based Cellular Networks: From Conventional to Machine Learning Approaches. *Drones*, 7, 3, 214. <https://doi.org/10.3390/drones7030214>

12. Reis, M. J., & Reis, A. J. (2025). Edge-Based Real-Time Fault Detection in UAV Systems via B-Spline Telemetry Reconstruction and Lightweight Hybrid AI. *Sensors*, 25, 16. 4944. <https://doi.org/10.3390/s25164944>
13. Allouch, A. et al. (2019). MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for UAV Systems. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.00265>
14. Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security Analysis of Drone Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations. *Internet of Things*, 11, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
15. Lin, W., & Huang, C. (2021). Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs. *Electronics*, 10, 11, 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>
16. Koval, V. V., Shmelov, V. O. (2022). Analiz zastosuvannia BpLA u suchasnykh zbroinykh konfliktakh [Analysis of the Use of UAVs in Modern Armed Conflicts]. *Nauka i oborona [Science and Defense]*, 3, 5–22. [in Ukrainian].
17. *Metodychni rekomendatsii shchodo zastosuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u Zbroinykh Sylakh Ukrainy [Methodological Recommendations for the Use of Unmanned Aircraft Complexes in the Armed Forces of Ukraine]*. (2023). Kyiv [in Ukrainian].
18. Bondarenko, Yu. L., & Ishchenko, I. A. (2025). Analiz system zhyvlennia elektrodvyhuniv rozvidualnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ I klasu [Analysis of Power Supply Systems of Reconnaissance Electric Motors Unmanned Aerial Vehicles of the 1st Class]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29, 107–124. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.08> Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].

Yu. L. Bondarenko, I. A. Ishchenko

ANALYSIS OF THE OPERATING MODES OF THE RECONNAISSANCE ELECTRIC MOTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE OF THE 1ST CLASS DURING COMBAT MISSIONS

The article presents the results of the analysis of the operating modes of the electric motor of reconnaissance unmanned aerial vehicles of the 1st class based on telemetry tlog files obtained during flights in the combat zone. The study was carried out on the basis of a sample of 450 flight logs of the tlog format, which ensures the representativeness of these results and allows to assess the real operating conditions of unmanned aerial vehicles. The main attention is paid to the assessment of the uniformity of the flight speed.

For the processing of telemetry data, a specialized software product tlog3 was developed, which provides automated data filtering, formation of agreed time series of flight parameters, smoothing of random noise and construction of speed change graphs, control signals and electrical parameters of the power plant. To increase the reliability of the assessment, the work uses the criterion for determining the uniformity of the flight, which is based on the limitation of the relative change in speed between neighboring samples of telemetry data, using a moving average.

Based on the analysis of the obtained graphs, the structure of the flight modes of unmanned aerial vehicles was determined, in particular, the share of the time spent in the maximum speed modes, steady (uniform) flight and transient processes. It was established that a significant part of the flight is characterized by a piecewise linear change in speed, which creates prerequisites for optimizing the traction control algorithms of the electric motor.

The main factors causing the unevenness of the flight have been determined, among which the maneuvering of the UAV, the influence of atmospheric disturbances and the peculiarities of the operation of the automatic control system play a key role. The obtained results can be used to further improve electric motor control algorithms and increase the energy efficiency of reconnaissance unmanned aerial vehicles of the 1st class in real operating conditions.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; telemetry; electric motor; flight mode; energy efficiency; autopilot.*

В. А. Романько

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0008-5749-284X>

Д. В. Коваль, канд. техн. наук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0009-5133-9542>

О. В. Левченко, д-р військ. наук, проф.

Воєнна академія імені Євгенія Березняка

<https://orcid.org/0000-0001-6254-591X>

ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗИДУАЛЬНОГО НЕЙРОННОГО ФІЛЬТРА КАЛМАНА В НАВІГАЦІЙНОМУ МОДУЛІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

У роботі розглянуто практичну реалізацію зовнішнього навігаційного модуля безпілотної літальної апарату на основі резидуального нейронного фільтра Калмана. Як експериментальну платформу використано малогабаритний одноплатний обчислювальний модуль класу Raspberry Pi-подібних платформ, який взаємодіє з польотним контролером, візуальним каналом і супутниковим навігаційним модулем. Основну увагу зосереджено не на польотних випробуваннях, а на відтворенні стендовій архітектурі, апаратно-програмній інтеграції та практичній сенсорній конфігурації з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами.

Показано, що для цілей поточного етапу достатньо використання наявного програмного стека польотного контролера, відтворюваного стендового контуру та окремого незалежного контуру для подальшого програмного розвитку. Підтверджено працездатність візуального та барометричного каналів, зв'язок із польотним контролером та діагностичну присутність магнітометра, а супутниковий канал – лише на рівні стендової видимості без вимоги стабільного приймання навігаційного розв'язку. Зафіксовано, що обрана платформа є придатною до ролі зовнішнього обчислювального контуру, на якому може бути реалізовано оброблення сенсорних даних і подальший розвиток навігаційного модуля.

Отримані результати формують відтворювану стендову основу для переходу до наступного етапу дослідження, пов'язаного з першим польотним зразком. Водночас політ, штатний робочий канал зв'язку між зовнішнім модулем і автопілотом, а також перехід на інший програмний стек автопілота свідомо винесено за межі цієї роботи.

Ключові слова: *резидуальний нейронний фільтр Калмана; зовнішній навігаційний модуль; безпілотної літальної апарату; одноплатний обчислювальний модуль; візуальний канал; супутникова навігація; барометричний канал.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Підвищення стійкості навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах деградації супутникового каналу є одним із основних завдань сучасних бортових систем. У ході експлуатації супутникові вимірювання можуть втрачати достовірність під впливом радіоелектронної протидії, багатопроменевості, короткочасних затіньень або триваліших збоїв. За таких обставин навігаційний контур, що спирається лише на штатні засоби польотного контролера, не завжди забезпечує потрібну стійкість оцінювання стану [1, 2].

Стаття висвітлює не ізольований результат, а третю ланку послідовного циклу досліджень, присвячених розвитку резидуального нейронного фільтра Калмана (РНФК) від формалізації ідеї до практичної реалізації. Базовий задум адаптивного використання РНФК було зафіксовано в патентній заявці України а202506585 [3]. У першій статті авторів [4] надано початкове модельне підтвердження працездатності підходу на стенді 1.1. У ній РНФК розглянуто як резидуальну нейронну надбудову над класичним фільтром Калмана та показано орієнтовне зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей близько на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана. Друга стаття циклу [5] перенесла дослідження на спрощений тривимірний модельний контур стендів 2.1 та 2.2, у якому було розвинено архітектуру РНФК і проаналізовано його роботу в сценаріях деградації навігаційних каналів. Отже, якщо обидві публікації відповідали переважно на питання про принципову працездатність та очікуваний ефект методу в модельному середовищі, то поточна стаття зосереджена на іншому питанні: чи можна перевести цей підхід у відтворювану стендову апаратно-програмну архітектуру зовнішнього навігаційного модуля. Саме тому в цій роботі увагу зосереджено на переході від модельного етапу до стендів 3.1 і 3.2, а наступним етапом циклу має стати стенд 4.1 як перший польотний зразок.

У такий спосіб цикл робіт утворює послідовну доказову базу: від патентної формалізації ідеї до початкового модельного ефекту стенда 1.1, далі – до поглибленого тривимірного моделювання на стендах 2.1, 2.2, потім – до відтворюваної апаратно-програмної стендової реалізації на стендах 3.1, 3.2 та зрештою – до польотної перевірки на стенді 4.1.

У цій статті розглянуто один із практичних варіантів застосування запатентованого РНФК: за погіршення якості супутникового каналу фільтр має зменшувати довіру до супутникових вимірювань і підсилювати роль візуального та барометричного каналів у формуванні навігаційної оцінки. Поточна робота доводить не повне натурне відпрацювання цього механізму, а побудову стендової архітектури, на якій такий режим може бути коректно реалізований і перевірений на наступному етапі.

Як експериментальну платформу використано Orange Pi Zero, яка розглядається як представник класу Raspberry Pi-подібних малогабаритних модулів для зовнішнього бортового оброблення даних. Такий вибір методично виправданий, оскільки метою є не порівняння конкретних торговельних моделей, а перевірка принципової придатності легкого зовнішнього обчислювального модуля до реалізації РНФК у практичному контурі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи фільтра Калмана, його рекурсивної схеми прогнозу та корекції, а також подальший розвиток безперервного

варіанта закладено в класичних працях Р. Калмана і Р. Б'юсі [6, 7]. Саме ці результати стали базою для сучасних інерціально-супутникових, візуально-інерціальних і комбінованих навігаційних систем.

З-поміж робіт українських авторів, релевантних до теми цієї статті, насамперед слід відзначити дослідження Є. Б. Артамонова, А. К. Жултинської, Т. І. Залозного, А. В. Радченка та К. М. Радченка, у яких розглянуто інтеграцію даних GPS та IMU в зашумленому середовищі [1]. Для інерціальних навігаційних систем БПЛА І. В. Зімчук і Т. М. Шапар виконали параметричний синтез алгоритмів фільтрації, а також окремо дослідили алгоритми фільтрації вимірювань акселерометричних датчиків у безплатформних інерційних системах [8, 9]. В умовах спотворення або навмисного підроблення супутникових вимірювань практичну цінність мають і результати М. Туряниці та Б. Четверікова щодо застосування фільтра Калмана для уточнення даних ГНСС-знімання з урахуванням спуфінгу [2].

Для візуального каналу та нейромережевого супроводу вітчизняного дослідницького контуру важливими є праці науковців із Житомирського військового інституту та зі спорідненого наукового середовища. Зокрема, С. В. Ковбасюк, Р. М. Осадчук, М. П. Романчук і Л. М. Наумчак розглянули алгоритм формування набору апріорних даних нейронної мережі для оброблення цифрових аерознімків [10]. Робота І. А. Пількевича, А. М. Токаря, О. В. Франжі та Р. І. Лободи присвячена навчально-тренувальній системі для підготовки операторів безпілотних авіаційних комплексів (БПАК) і фіксує прикладний контекст розгортання вітчизняних БПАК, хоча не вирішує завдання бортового мультисенсорного оцінювання стану [11].

У закордонних роботах останніх років основну увагу зосереджено на мультисенсорних архітектурах GNSS / IMU / CAM / BARO, візуально-інерціальній локалізації в середовищах із деградацією або втратою супутникового каналу, а також на гібридизації класичних фільтрів із нейромережевими модулями. Так, S. A. Negru, P. Geragersian, I. Petrunin і W. Guo запропонували гібридну федеративну архітектуру, що інтегрує GNSS, IMU, монокулярну камеру та барометр для підвищення живучості навігації БПЛА [12]. A. Tonini, M. Castelli, J. S. Bates, N. Lin і M. Painho дослідили візуально-інерційну локалізацію літальних апаратів в умовах відсутності або недоступності супутникового каналу [13], а E. Gallo й A. Barrientos – візуально-інерціальну навігацію для фіксованокрилих БПЛА на основі віртуального візуального сенсора [14]. Для гібридних фільтрів із компонентами, що навчаються, показовою є також праця Y. Aburasain, M. Bilal і K. Kim, у якій досліджено інтеграцію нейронної мережі з фільтром Калмана для підвищення точності передбачення в динамічних системах [15].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що на сьогодні достатньо опрацьовано окремі аспекти інерціально-супутникової інтеграції, візуально-інерціальної навігації, барометричного супроводу та нейромережевої корекції класичних фільтрів. Водночас недостатньо висвітленим залишається практичний перехід від патентно-алгоритмічної ідеї РНФК до відтворюваної стендової архітектури зовнішнього навігаційного модуля, у якій поєднуються польотний контролер, легкий зовнішній обчислювальний модуль, візуальний канал і барометричний канал у сценарії деградації супутникових вимірювань.

Формулювання завдання дослідження. Метою роботи є доведення практичної реалізованості зовнішнього навігаційного модуля на основі РНФК у стендовій архітектурі з використанням Orange Pi Zero, польотного контролера SpeedyBee F405 V3, камери HBVCAM F2316HD / OV2710 та супутникового модуля Weitian BE-252Q.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

побудувати стендову архітектуру зовнішнього навігаційного модуля, у якій польотний контролер, зовнішній обчислювальний модуль, візуальний, супутниковий і барометричний канали утворюють мінімально достатній практичний контур;

узгодити канонічну мультисенсорну архітектуру IMU / GNSS / MAG / CAM із реально доступною конфігурацією інерціального, супутникового, барометричного та візуального каналів;

виконати апаратно-програмну інтеграцію вузлів стенда, визначити мінімально достатню конфігурацію обладнання та зафіксувати критерії приймання стендового контуру;

експериментально підтвердити працездатність побудованого контуру й показати, що він є придатною основою для подальшої реалізації режиму перерозподілу довіри від деградованого супутникового каналу до візуального та барометричного каналів.

Наукова новизна дослідження полягає в перенесенні РНФК із патентно-модельного та тривимірного модельного контуру у відтворювану стендову архітектуру зовнішнього навігаційного модуля, а також в узгодженні канонічної сенсорної схеми серії робіт із реальною апаратною конфігурацією цієї статті. Практичне значення роботи зводиться до формування відтворюваної апаратно-програмної основи, придатної до наступного переходу від стендового рівня до польотного етапу.

Виклад основного матеріалу

Архітектура зовнішнього навігаційного модуля. У запропонованій архітектурі польотний контролер (Flight Controller – FC) SpeedyBee F405 V3 забезпечує низькорівневу стабілізацію та є джерелом інтегрованих сенсорів. Зовнішній модуль Orange Pi Zero виконує роль додаткового обчислювального контуру, на якому може бути реалізовано РНФК, попереднє оброблення візуальних даних і логіку оцінювання довіри до вимірювань. Камера HBVCAM F2316HD / OV2710 формує візуальний канал, а модуль Weitian BE-252Q забезпечує супутникову навігаційну прив'язку через польотний контролер.

У межах цього циклу робіт РНФК пройшов послідовний шлях від патентного опису та математичної ідеї до початкового модельного, а далі до поглибленого тривимірного модельного, потім до стендового рівня перевірки. Еволюцію стендів і етапів циклу робіт узагальнено в табл. 1.

У такій інтерпретації стенд 1.1 фіксує перший технічний результат циклу: у статті [4] для нього показано орієнтовне зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана, а також підвищення стійкості до викидів у супутникових вимірюваннях та зростання шуму інерціальних датчиків [4]. Стенди 2.1 і 2.2 поглиблюють цей результат у тривимірному модельному контурі, а стенди 3.1 і 3.2, розглянуті в цій статті, переводять цикл у відтворювану апаратно-програмну площину.

Еволюція стендів і етапів циклу робіт

| Код стенда | Робоча назва | Призначення | Місце в циклі |
|------------|--------------------------------------|---|---|
| Стенд 1.1 | Початковий модельний стенд РНФК | Імітаційне моделювання НФК як резидуальної надбудови над класичним оцінювачем з одержанням перших кількісних оцінок точності й завадостійкості | Перший кількісний доказ першої статті і методична передумова РНФК |
| Стенд 2.1 | Базовий тривимірний стенд | Спрощене тривимірне моделювання сценаріїв: номінальний режим, інтенсивні маневри, деградація супутникового каналу, комбінована деградація каналів | Основний модельний доказ другої статті циклу |
| Стенд 2.2 | Стенд для багатощарового перцептрона | Формування і перевірка навчальної вибірки для варіанта Multilayer Perceptron (MLP) РНФК | Допоміжний стенд другої статті циклу |
| Стенд 3.1 | Канонічний стендовий контур | Відтворюваний стендовий контур із діагностичними процедурами та пакетом артефактів | Головне джерело доказів цієї статті |
| Стенд 3.2 | Незалежний чистий контур | Відокремлений контур для перевірки незалежної структури виконання | Додаткове джерело доказів цієї статті |
| Стенд 4.1 | Перший польотний зразок | Перехід до обмежених польотних випробувань і нового каналу штатної взаємодії | Наступний етап циклу |

Для цілісності циклу доцільно розрізнити три класи стендів. Стенди 1.1, 2.1 та 2.2 належать до модельного класу, у якому головним доказом є кількісна оцінка ефекту алгоритму. Стенди 3.1 і 3.2 – до апаратно-стендового класу, у якому головним доказом є відтворюваність реального контуру, наявність каналів і коректність інтеграції вузлів. Стенд 4.1 має становити польотний клас, у якому головним доказом уже буде працездатність у реальному русі й польотних обмеженнях.

Окреслене питання пропонуємо розв'язати через чітке розмежування двох рівнів опису сенсорної системи. У канонічному описі серії РНФК розглядається як архітектура з інерційним вимірювальним модулем (Inertial Measurement Unit – IMU), супутниковою навігаційною системою (Global Navigation Satellite System – GNSS), магнітометром (Magnetometer – MAG) і камерою (Camera – CAM). Натомість у поточній роботі центральною є практична експериментальна конфігурація з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами, яка відповідає реально зібраному стенду. За такого підходу MAG не виключається концептуально, але не виноситься в центральний канал аналізу, тоді як барометричний канал розглядається як штатне джерело висотної інформації першого етапу [4, 5]. Склад практичної сенсорної конфігурації та ролі окремих каналів відображено в табл. 2.

Таблиця 2

Практична сенсорна конфігурація зовнішнього навігаційного модуля

| Канал | Джерело даних | Практична роль у поточному дослідженні | Статус |
|-------|---------------------------------------|--|--------------|
| IMU | Польотний контролер SpeedyBee F405 V3 | Базовий інерціальний канал | Обов'язковий |

| Канал | Джерело даних | Практична роль у поточному дослідженні | Статус |
|--------------------------------|---|---|----------------|
| GNSS | Beitian BE-252Q через польотний контролер | Супутникова навігаційна прив'язка на стендовому рівні | Обов'язковий |
| Барометр польотного контролера | Інтегрований барометр польотного контролера | Штатний висотний канал першого етапу | Обов'язковий |
| CAM | HBVCAM F2316HD / OV2710, підключена до Orange Pi Zero | Візуальний канал зовнішнього модуля | Обов'язковий |
| MAG | MAG у контурі польотного контролера | Діагностичний або фоновий канал | Не центральний |

Функціональний розподіл в системі є таким: польотний контролер забезпечує штатні контури стабілізації та доступ до IMU, GNSS і барометричного каналу; зовнішній модуль приймає візуальний потік, взаємодіє з контролером і формує зовнішню навігаційну оцінку; CAM забезпечує візуальний канал для виокремлення ознак та оцінювання переміщення; барометр використовується як практичний висотний канал; MAG зберігається як фоновий або діагностичний канал. Структурну схему цієї конфігурації наведено на рис. 1.

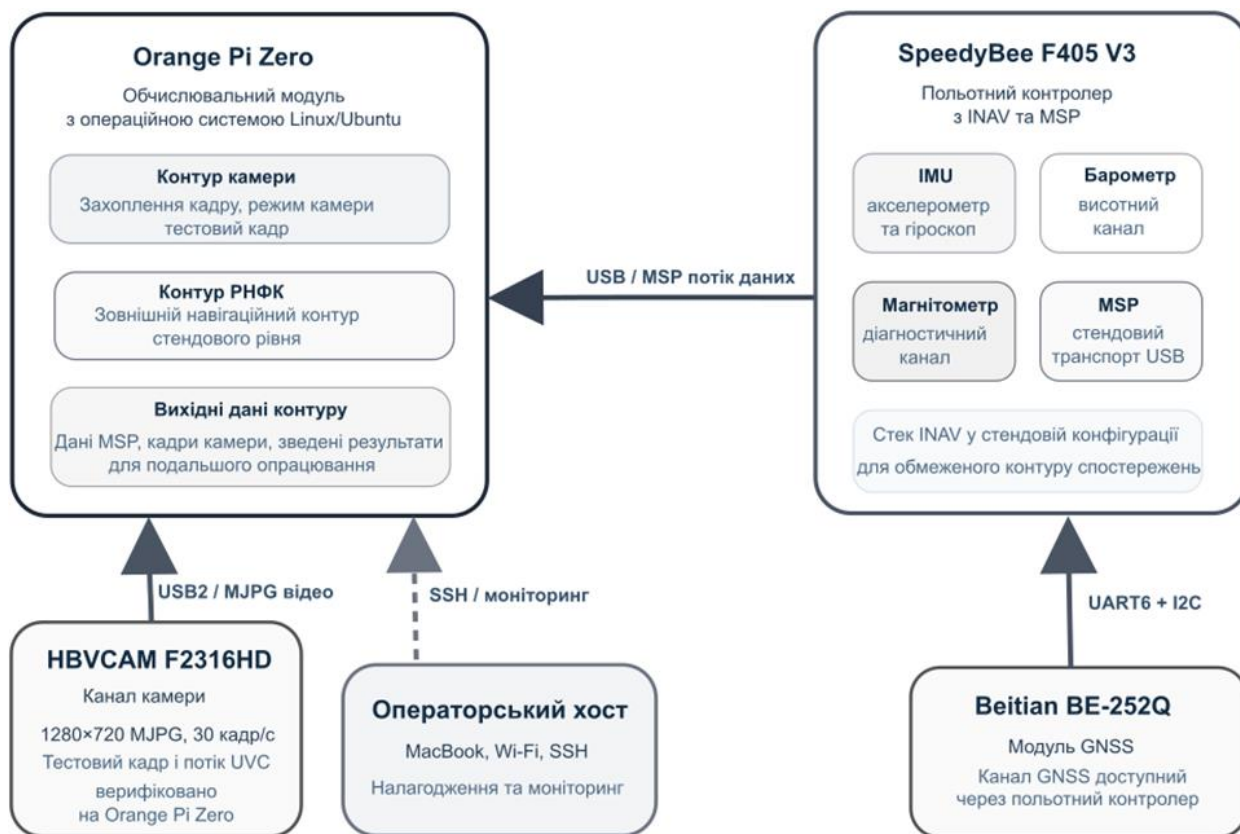


Рис. 1. Структурна схема зовнішнього навігаційного модуля БпЛА в експериментальній конфігурації

Теоретичною основою запропонованого підходу є поєднання фільтра Калмана з резидуальною нейронною корекцією та механізмом адаптивного перерозподілу довіри до

сенсорних каналів. У рамках цього дослідження вважаємо за доцільне обмежитися тими елементами методу, які безпосередньо пов'язані з архітектурною роллю зовнішнього модуля. Нехай вектор стану включає координати, швидкості та орієнтаційні параметри апарата, а вектор вимірювань формується на основі каналів IMU, GNSS, барометричного каналу і САМ. Класична частина оцінювання виконується на основі прогнозу динаміки та корекції за доступними вимірюваннями, а нейронна резидуальна частина формує поправку до базового оцінювання з урахуванням інновацій та ознак якості сенсорного набору [4, 6, 7, 15].

У найзагальнішому вигляді дискретну модель динаміки зовнішнього навігаційного контуру можна подати в такий спосіб:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k, \quad (1)$$

де x_k – вектор стану на кроці k ;

F_k – матриця переходу стану;

B_k – матриця керування;

u_k – вектор керувальних або службових впливів;

w_k – шум процесу.

Модель вимірювань для мультисенсорного контуру запишемо в такому вигляді:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (2)$$

де z_k – вектор вимірювань;

H_k – матриця спостереження;

v_k – шум вимірювань.

Слід зауважити, що вектор z_k формується з інерціального, супутникового, барометричного та візуального каналів, а практична конфігурація стенда визначає, які саме компоненти цього вектора реально доступні на кожному кроці.

Базове рекурсивне оцінювання в класичному фільтрі Калмана виконується через кроки прогнозу і корекції:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k, \quad (3)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k, \quad (4)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (5)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}), \quad (6)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \quad (7)$$

де $\hat{x}_{k|k-1}$ – прогноз стану перед урахуванням вимірювань;

$\hat{x}_{k|k}$ – оцінка стану після корекції;

$P_{k|k-1}$ – коваріаційна матриця похибки прогнозу;

$P_{k|k}$ – коваріаційна матриця похибки після корекції;

Q_k – коваріаційна матриця шуму процесу;

R_k – коваріаційна матриця шуму вимірювань;

K_k – матриця коефіцієнтів Калмана;

I – одинична матриця.

У логіці РНФК класична оцінка доповнюється резидуальною нейронною поправкою:

$$\hat{x}_{k|k}^{\text{RNFK}} = \hat{x}_{k|k} + \Delta x_k^{\text{NN}}, \quad (8)$$

$$\Delta x_k^{\text{NN}} = f_{\theta}(r_k, q_k), \quad (9)$$

$$r_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}, \quad (10)$$

де $\hat{x}_{k|k}^{\text{RNFK}}$ – скоригована оцінка стану в РНФК;

Δx_k^{NN} – нейронна резидуальна поправка;

$f_{\theta}(\cdot)$ – нейромережевий модуль з параметрами θ ;

r_k – вектор інновацій;

q_k – ознаки якості та доступності сенсорних каналів.

Саме величини r_k і q_k дають змогу в РНФК зменшувати довіру до деградованого супутникового каналу і посилювати внесок візуального та барометричного каналів у формування підсумкової навігаційної оцінки.

Принципова роль зовнішнього модуля полягає в тому, що він дає змогу додатково обробляти інформацію візуального каналу, оцінювати якість вимірювань і перебудовувати довіру до каналів у разі погіршення якості супутникових даних, не втручаючись безпосередньо в низькорівневий контур стабілізації. У логіці запатентованого РНФК це означає зменшення ваги деградованого супутникового каналу та посилення ролі візуального й барометричного каналів у формуванні оцінки стану. Для цієї статті важливо, що стендова архітектура вже містить саме той мінімально достатній набір каналів, на якому такий режим може бути реалізований у наступних роботах.

Апаратно-програмна реалізація та методика стендової перевірки. У поточній роботі Orange Pi Zero використано як доступну експериментальну платформу для відпрацювання зовнішнього навігаційного контуру. Отримані результати стосуються не лише цієї конкретної плати, а й ширшого класу малогабаритних Raspberry Pi-подібних платформ, придатних до побудови зовнішніх бортових обчислювальних модулів.

Мінімально достатній комплект поточної роботи слід відділяти від сервісного оточення. До обов'язкової конфігурації належать вузли зовнішнього навігаційного модуля і штатні сенсорні джерела, тоді як сервісний доступ і окреме живлення потрібні для стендової верифікації, збирання артефактів і підтримки відтворюваності. Склад цієї апаратної конфігурації узагальнено в табл. 3.

Для забезпечення відтворюваності на одноплатному модулі Orange Pi Zero використано програмне середовище на основі операційної системи Linux / Ubuntu, а саме Armbian Linux v25.5.1 for Orange Pi Zero з ядром 6.12.23-current-sunxi. У межах цієї статті

вказана характеристика фіксує саме програмну основу зовнішнього модуля і доповнює апаратну схему стенда, але не замінює її.

Таблиця 3

Мінімально достатня апаратна конфігурація стенда поточного етапу дослідження

| Вузол | Роль у системі | Інтерфейс / підключення | Статус у цьому дослідженні |
|--|---|--|------------------------------|
| Одноплатний обчислювальний модуль Orange Pi Zero | Зовнішній обчислювальний модуль | Центральний вузол стенда | Обов'язковий |
| Польотний контролер SpeedyBee F405 V3 | Джерело інтегрованих сенсорів і канал обміну із зовнішнім модулем | Хостовий роз'єм універсальної послідовної шини (Universal Serial Bus – USB) на Orange Pi Zero, з'єднаний із роз'ємом USB-C польотного контролера | Обов'язковий |
| CAM HBVCAM F2316HD / OV2710 | Візуальний канал | Порт USB 2.0 | Обов'язковий |
| Супутниковий модуль Beitian BE-252Q | Супутниковий канал | Інтерфейс до польотного контролера | Обов'язковий |
| Барометр польотного контролера | Штатний висотний канал | Інтегрований у польотний контролер | Обов'язковий |
| MAG польотного контролера | Фоновий діагностичний канал | Інтегрований або штатний зовнішній контур польотного контролера | Не центральний |
| Акумуляторний блок | Стендове живлення Orange Pi Zero | Кабель USB-A – mini-USB для живлення | Лише для стендового живлення |
| Операторський комп'ютер | Сервісний доступ і збір матеріалів | Бездротова мережа та віддалений доступ | Сервісний |

У стенді 3.1 CAM підключена до порту USB 2.0 плати Orange Pi Zero, а польотний контролер – до Orange Pi Zero через канал USB / MSP, де MSP означає протокол MultiWii Serial Protocol. Супутниковий модуль Beitian BE-252Q підключено до SpeedyBee F405 V3 через шостий порт універсального асинхронного приймально-передавального інтерфейсу (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – UART) і двопровідну послідовну шину (Inter-Integrated Circuit – I2C).

Варто зауважити, що описана конфігурація є саме стендовою, тому не потрібно її плутати з майбутньою польотною архітектурою. Схему підключень стенда 3.1 наведено на рис. 2.

Практична складова дослідження ґрунтується на двох стендах. Стенд 3.1 є канонічним стендовим контуром, у якому зосереджено основні діагностичні перевірки, пакет артефактів і базові докази працездатності всієї апаратної конфігурації. Стенд 3.2 є незалежним чистим контуром, який відокремлює подальшу структуру виконання від первинного стендового оточення. Саме ця пара стендів формує канонічне джерело практичних результатів поточної роботи, але головним джерелом рисунків і кількісних приміток є стенд 3.1. Розмежування ролей стендів показано на рис. 3, а їх місце в циклі робіт наведено в табл. 1.

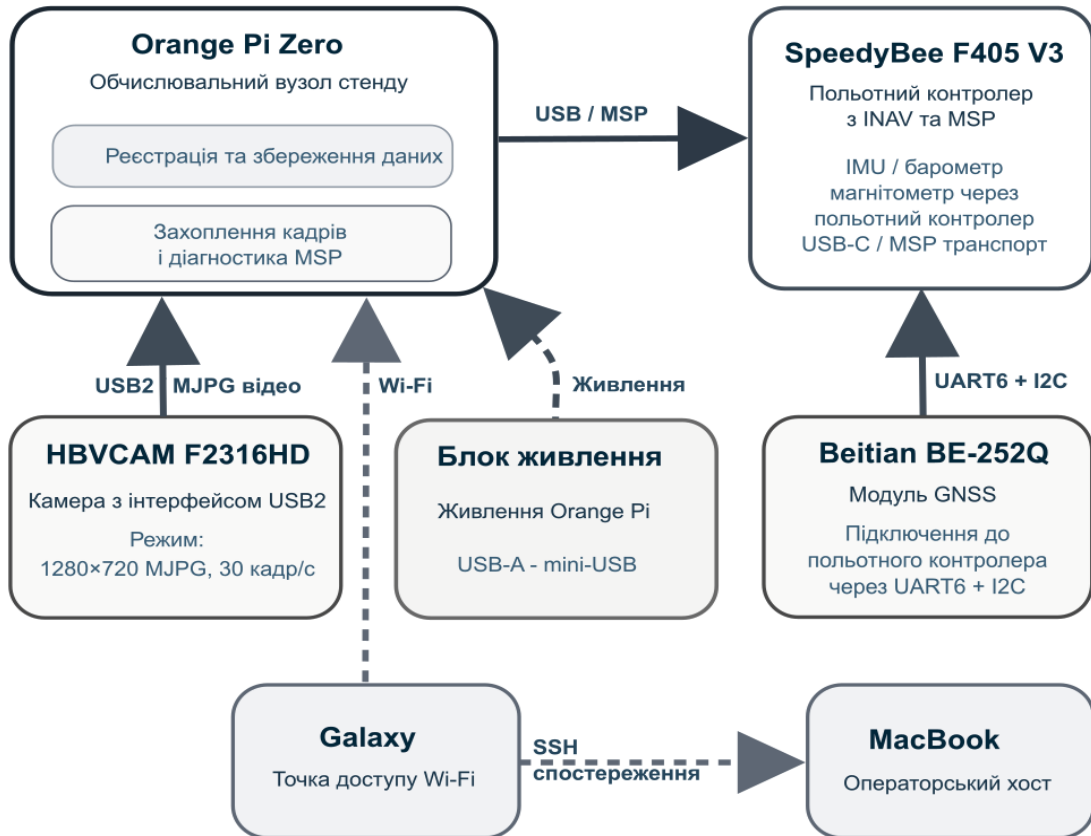


Рис. 2. Схема підключень стенда 3.1 для апаратно-програмної перевірки зовнішнього навігаційного модуля

Для взаємодії між Orange Pi Zero і польотним контролером у поточній стендовій конфігурації використано канал USB / MSP.

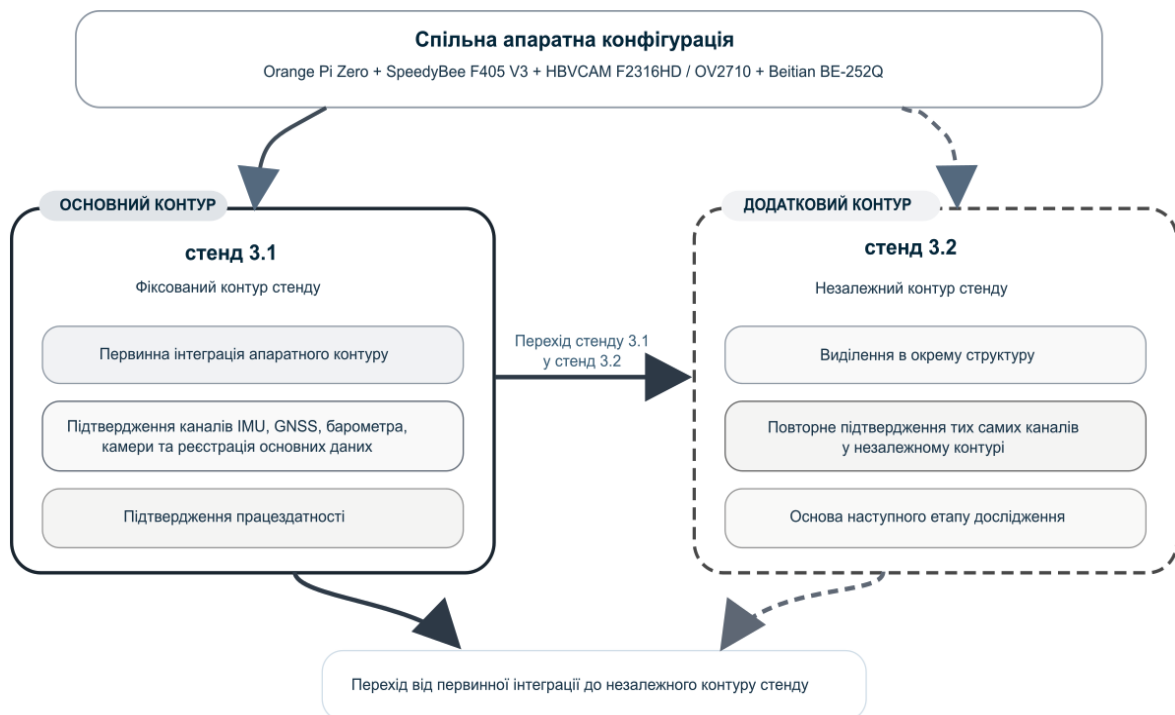


Рис. 3. Розмежування стендів 3.1 і 3.2 у структурі практичної реалізації

Такий вибір є достатнім для цього дослідження, оскільки його мета полягає не в побудові штатного робочого каналу зв'язку, а в підтвердженні працездатності зовнішнього навігаційного контуру. Перехід на UART як основний канал взаємодії свідомо винесений у наступний етап, пов'язаний із першим польотним зразком.

Редакційна межа між цією статтею і наступною польотною роботою повинна фіксуватися чітко: на цьому етапі доводиться завершений стендовий контур, але не штатний польотний канал взаємодії і не політ. Візуалізацію цієї межі наведено на рис. 4, а порівняння параметрів двох етапів – у табл. 4.



Рис. 4. Перспективи подальших досліджень: від стендової архітектури до першого польотного зразка

Таблиця 4

Межа між цим етапом дослідження та перспективною публікацією

| Параметр | Поточна стаття | Наступна публікація |
|--|---|--|
| Канонічні стенди | Стенд 3.1, стенд 3.2 | Стенд 4.1 |
| Стек польотного контролера | Стек автопілота INAV, тобто навігаційно-орієнтоване програмне забезпечення польотного контролера, є достатнім | ArduPilot або окремо обґрунтований польотний стек |
| Канал між Orange Pi Zero і польотним контролером | Стендовий USB / MSP допустимий | Основним є UART |
| Рівень доказу | Завершений стендовий контур, діагностика пристроїв, відтворювані артефакти | Польотний контур виконання, відмовостійкість, обмежені польотні випробування |
| Обов'язковість польоту | Ні | Так |

Фактична перевірка CAM показала, що базовим робочим режимом для Orange Pi Zero є 1280 × 720 у форматі Motion JPEG (MJPG) зі швидкістю 30 кадрів за секунду. Режими 60 кадрів за секунду для цієї CAM не підтверджено ні на MacBook, ні на Orange Pi Zero, тому їх не слід закладати як обов'язкову вимогу архітектури.

Методика стендової перевірки включає перевірку CAM, зв'язку з польотним контролером через USB / MSP, IMU, супутникового каналу (GPS), барометричного каналу

(BARO) та MAG. Канонічний стендовий контур стенда 3.1 вважається завершеним, якщо команда верхнього рівня doctor повертає статус pass, а артефакти всіх ключових перевірок, тестовий кадр, оглядові дані FC / MSP і компактні рисунки збережені локально. Незалежний стенд 3.2 вважається підготовленим, якщо його команда doctor також повертає статус pass, підтверджуючи, що структура виконання не залежить від канонічного стендового контуру. Критерії приймання цього контуру надано в табл. 5.

Таблиця 5

Критерії приймання стенда поточного етапу дослідження

| Перевірка | Очікуваний результат | Джерело доказу |
|------------------|---|------------------------------------|
| CAM | CAM визначається і дає валідний потік | camera_check.json, camera_test.jpg |
| UART / USB / MSP | Польотний контролер визначається через USB / MSP | uart_check.json, bench_doctor.json |
| IME | IMU читається через польотний контролер | imu_check.json |
| GPS | GNSS видимий у MSP-контурі | gps_check.json |
| BARO | Барометричний канал читається через польотний контролер і MSP | baro_check.json |
| MAG | MAG має валідний raw / status сигнал | mag_check.json |
| Стенд 3.1 doctor | Канонічний стенд повертає статус pass | bench_doctor.json |
| Стенд 3.2 doctor | Незалежний чистий контур повертає статус pass | stand_doctor.json |

Результати стендової перевірки. Практичним результатом дослідження є побудова та відтворене підтвердження стендової архітектури зовнішнього навігаційного модуля БПЛА на базі Orange Pi Zero у взаємодії з польотним контролером SpeedyBee F405 V3, CAM HBVCAM F2316HD / OV2710 і супутниковим модулем Weitian BE-252Q. На відміну від суто модельної постановки, у цій роботі показано, що зазначені апаратні компоненти можуть бути інтегровані в єдиний апаратно-програмний контур із відтворюваними процедурами перевірки та збереженням діагностичних артефактів.

Для стенда 3.1 підтверджено працездатність стендового контуру, у якому доступні канал CAM, зв'язок із польотним контролером через USB / MSP, базова діагностична видимість каналів IMU, супутникової навігації, барометричного висотного каналу та MAG через польотний контролер. Канонічний прогін 3.1 сформував локально збережений пакет артефактів: bench_doctor.json, статуси каналів у форматі JavaScript Object Notation (JSON), тестовий кадр, оглядові дані FC / MSP у форматах JSON і Comma-Separated Values (CSV) та три компактні векторні рисунки у форматі Scalable Vector Graphics (SVG) для розділу результатів. Для стенда 3.2 підтверджено можливість винесення подальшого контуру виконання в незалежну структуру без змішування з первинним стендовим середовищем, однак окремий вторинний пакет артефактів для нього поки не є обов'язковою умовою завершення цього етапу дослідження. Отже, у роботі доведено не повний польотний зразок, а завершений і відтворюваний стендовий рівень практичної реалізації зовнішнього навігаційного модуля з інерціальним, супутниковим, барометричним та візуальним каналами.

У короткому оглядовому прогоні тривалістю 4,6 с для стенда 3.1 отримано показники $gps_active_ratio = 1,0$, $gps_fix_ratio = 0,0$ і $satellites_max = 0$. Це означає, що GNSS у межах цієї статті слід інтерпретувати як стендову видимість через FC / MSP, а не як доказ стабільного супутникового навігаційного розв'язку. Одночасно тестовий кадр CAM і статусні дані

у форматі JSON підтверджують працездатність CAM, а IMU, барометричний канал і MAG подані як реальні діагностичні канали канонічного стендового контуру.

Два додаткові успішні прогони стенда 3.1 зі статусом pass підтверджують відтворюваність канонічної стендової процедури на рівні, достатньому для цього етапу дослідження. Часову діаграму активності каналів наведено на рис. 5, GNSS тут трактується як стендова видимість каналу через MSP, а не як доказ стабільного супутникового навігаційного зв'язку.

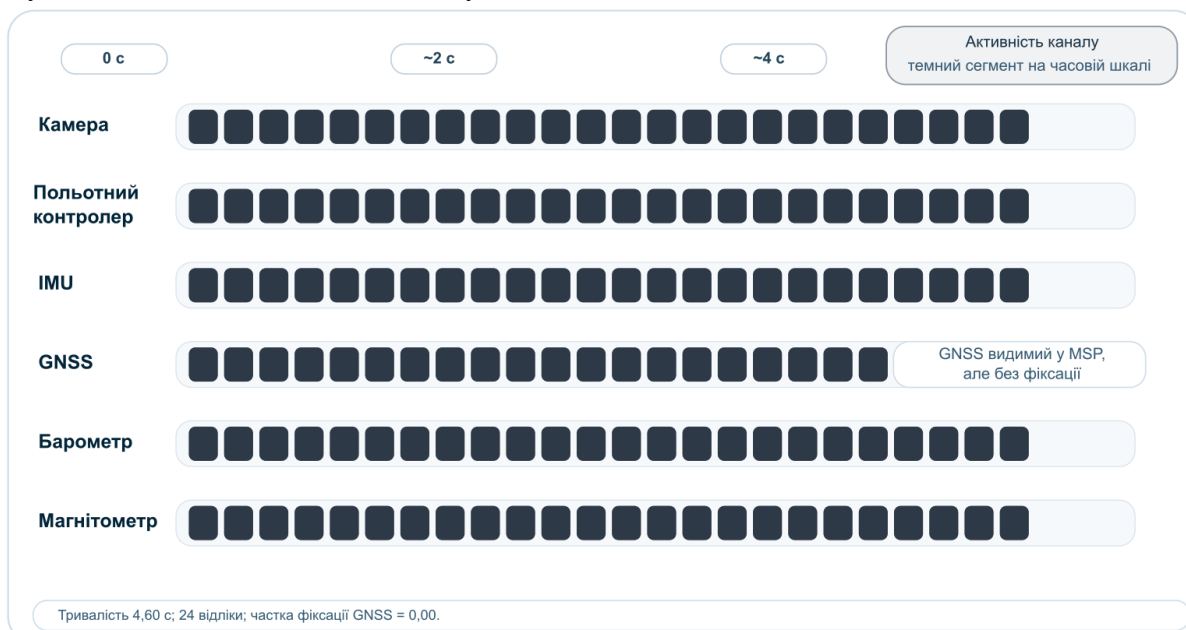


Рис. 5. Часова діаграма активності каналів стенда 3.1 під час канонічного прогону

Огляд вибраних реальних сигналів показано на рис. 6, призначеному для компактної ілюстрації реальних часових рядів, а не для польотної валідації.

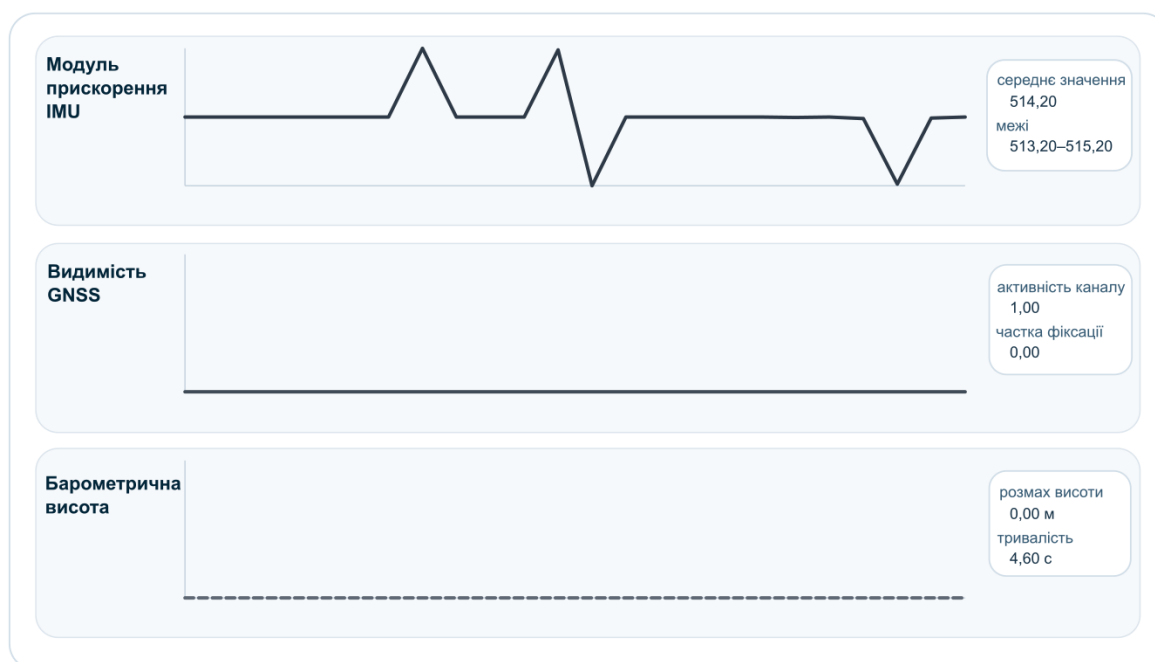


Рис. 6. Огляд вибраних реальних сигналів IMU, GNSS і барометричного каналу, зчитаних у канонічному стендовому контурі стенда 3.1

Узагальнювальну діаграму стану стенда та повторних прогонів показано на рис. 7.

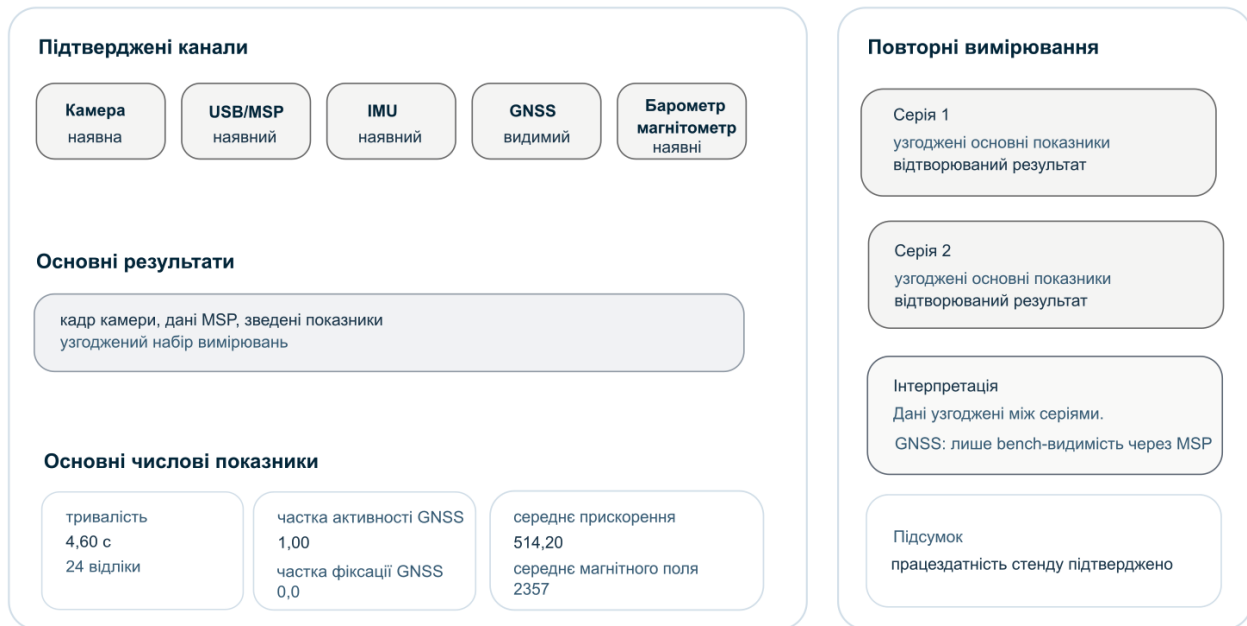


Рис. 7. Компактна узагальнена діаграма стану стенда 3.1 і повторних успішних прогонів, що підтверджують відтворюваність завершеного стендового контуру

Важливим результатом є також узгодження канонічної мультисенсорної архітектури РНФК із реально доступною експериментальною конфігурацією. Якщо в загальному методичному контурі серії робіт розглядається конфігурація IMU / GNSS / MAG / CAM, то для цієї статті практично відпрацьовано конфігурацію з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами, у якій барометричний канал використовується як штатне джерело висотної інформації, а MAG зберігається як діагностичний або фоновий канал. Це не звужує концепції методу, а переводить її у форму, придатну до реальної стендової реалізації.

Якщо розглядати цикл робіт як єдиний ланцюг доказів, то саме стенд 1.1, описаний у [4], дав початкову кількісну оцінку технічного результату методу. Для нього показано орієнтовне зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана; у сценарії інтенсивних маневрів RMSE координат за горизонталлю вона зменшувалася з 12,4 м до 7,1 м, а похибка швидкості – з 1,8 м/с до 1,1 м/с. Для сценарію з викидами GNSS максимальне відхилення траєкторії знижувалося приблизно з 65 м до 38 м. У межах описаного дослідження ці дані не переоцінюються, а використовуються як вихідна модельна основа для переходу до стендів 3.1, 3.2.

Результати попереднього тривимірного моделювання, наведені в [5] щодо РНФК для підвищення завадостійкості навігації БпЛА, додатково показують очікуваний прикладний ефект від його використання. Для тривимірного стенда в сценаріях «Деградація супутникового каналу» і «Комбінована деградація каналів» відносно базового розширеного фільтра Калмана (Extended Kalman Filter – EKF) отримано орієнтовне зменшення середньоквадратичної похибки (Root Mean Square Error – RMSE) координат на 74,9%, зниження RMSE швидкості близько на 47,0%, зменшення максимального

відхилення – на 61,2%, а кількості зривів фільтрації – приблизно на 96,4%. Для реального стенда ці значення слід трактувати не як прямий результат, а як кількісне обґрунтування доцільності побудови зовнішнього навігаційного модуля на основі РНФК.

Отримані результати є практичним підтвердженням архітектурної та сенсорної придатності стенда до подальшого відпрацювання алгоритмів навігаційної підтримки в умовах деградації супутникового каналу. У межах цієї публікації не ставилося за мету натурне доведення повного механізму заміщення GNSS візуальним і барометричним каналами. Натомість сформовано відтворювану апаратно-програмну базу, на якій такий механізм може бути досліджений на наступному етапі.

Головний практичний висновок проведеного дослідження полягає в тому, що Orange Pi Zero є методично придатною платформою для побудови відтворюваної стендової архітектури РНФК. Водночас ця публікація не претендує на доведення польотної готовності системи, а фіксує завершений і відтворюваний рівень стендової реалізації.

Висновки. У роботі практично обґрунтовано стендову архітектуру зовнішнього навігаційного модуля БпЛА на базі Orange Pi Zero, польотного контролера SpeedyBee F405 V3, CAM HBVCAM F2316HD / OV2710 і модуля Weitian BE-252Q. Показано, що для цілей описаного етапу дослідження достатнім і методично коректним є стендовий рівень верифікації, у якому центральною є практична конфігурація з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами.

Підтверджено відтворюваність двох взаємопов'язаних стендів: 3.1 як канонічного стендового контуру для діагностичних процедур, 3.2 як незалежного чистого контуру для наступного етапу виконання.

Узгоджено наскрізну логіку циклу робіт, у якій стенд 1.1 фіксує перший кількісний модельний результат першої статті [4], стенди 2.1 і 2.2 поглиблюють його у тривимірному модельному контурі, а 3.1 і 3.2 переводять метод у відтворювану апаратно-програмну площину цього етапу дослідження.

Отже, загальна структура циклу робіт уже має послідовний вигляд: від алгоритмічної ідеї та її модельного підтвердження до тривимірної перевірки стійкості, далі до реальної стендової відтворюваності та зрештою до польотної верифікації. Саме така послідовність досліджень робить внесок окремих статей несуперечливим і взаємодоповнювальним.

Підтверджено присутність і працездатність каналу CAM, зв'язку з польотним контролером через USB / MSP, а також каналів IMU, барометричного каналу і діагностичної видимості MAG через польотний контролер; для GNSS доведено стендову видимість каналу в MSP-контурі без вимоги стабільного супутникового навігаційного зв'язку.

Сформовано практичну апаратно-програмну основу для подальшого дослідження механізмів підтримки навігації в разі деградації супутникового каналу, однак повне натурне відпрацювання заміщення GNSS візуальним і барометричним каналами заплановано на майбутнє.

Отже, у межах цієї статті підтверджено не кінцевий польотний ефект запатентованого РНФК, а коректність одного з практичних шляхів його застосування: побудову зовнішнього навігаційного модуля, у якому в разі деградації супутникового каналу може бути реалізовано перерозподіл довіри на візуальний і барометричний канали.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Використання фільтра Калмана для інтеграції даних GPS та IMU в зашумленому середовищі / Є. Б. Артамонов, А. К. Жултинська, Т. І. Залозний, А. В. Радченко та ін. // Технічна інженерія. 2024. Т. 2 (94). С. 69–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-69-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-69-80)
2. Туряниця М., Четверіков Б. Застосування фільтра Калмана для уточнення даних ГНСС-знімання з урахуванням спуфінгу // Вісник Львів. політехніки. 2025. Вип. 49. С. 61–70. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/118523> (дата звернення: 01.03.2026).
3. Романько В. А. Спосіб адаптивного наведення високодинамічного апарата з використанням резидуального нейронного фільтра Калмана : заявка на винахід України а202506585 (заявл. 29.12.2025; перебуває на кваліфікаційній експертизі).
4. Романько В. А., Срібний О. М. Інтеграція нейронного фільтра Калмана в систему наведення високодинамічних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 29. С. 125–139. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.09>
5. Романько В. А., Жовноватюк Р. М. Резидуальний нейронний фільтр Калмана для підвищення завадостійкості навігації БпЛА // Технічна інженерія. 2026. № 1 (97). С. 382–396. [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-382-396](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-382-396)
6. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
7. Kalman R. E., Bucy R. S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83, No. 1. P. 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>
8. Зімчук І. В., Шапар Т. М. Параметричний синтез алгоритмів фільтрації для інерціальних навігаційних систем безпілотних літальних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 28 (I). С. 37–50. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.04>
9. Зімчук І. В., Шапар Т. М., Ковба М. В. Алгоритм фільтрації вимірювань акселерометричних датчиків у безплатформених інерціальних системах навігації безпілотних літальних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (I). С. 44–55. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.04>
10. Алгоритм формування набору апріорних даних нейронної мережі для обробки цифрових аерознімків / С. В. Ковбасюк, Р. М. Осадчук, М. П. Романчук, Л. М. Наумчак // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2022. Вип. 23. С. 77–88. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.06>
11. Навчально-тренувальна система для підготовки операторів безпілотних авіаційних комплексів / І. А. Пількевич, А. М. Токар, О. В. Франжі, Р. І. Лобода // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2021. Вип. 20. С. 83–97. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.08>
12. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture / S. A. Negru, P. Geragersian, I. Petrunin, W. Guo // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 3. Article 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>

13. Visual-Inertial Method for Localizing Aerial Vehicles in GNSS-Denied Environments / A. Tonini, M. Castelli, J. S. Bates, N. N. Lin et al. // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 20. Article 9493. <https://doi.org/10.3390/app14209493>
14. Gallo E., Barrientos A. Long-Distance GNSS-Denied Visual Inertial Navigation for Autonomous Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: SO(3) Manifold Filter Based on Virtual Vision Sensor // Aerospace. 2023. Vol. 10, No. 8. Article 708. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080708>
15. Aburasain Y., Bilal M., Kim K. Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems through Neural Network Integration with Kalman and Alpha-Beta Filters // PLOS ONE. 2024. Vol. 19, No. 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>

Стаття надійшла до редакції 11.05.2026.

Прийнято до друку 20.05.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

REFERENCES

1. Artamonov, Ye. B., Zhultynska, A. K., Zaloznyi, T. I., & Radchenko, A. V., et al. (2024). Vykorystannia filtra Kalmana dlia intehratsii danykh GPS ta IMU v zashumlenomu seredovysshchi [Using the Kalman Filter for Integrating GPS and IMU Data in a Noisy Environment]. *Tekhnichna inzheneriia [Technical Engineering]*, 2 (94), 69–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-69-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-69-80) [in Ukrainian].
2. Turianytsia, M., & Chetverikov, B. (2025). Zastosuvannia filtra Kalmana dlia utochnennia danykh HNSS-znimannia z urakhuvanniam spufinhu [Application of the Kalman Filter to Refine GNSS Survey Data Taking into Account Spoofing]. *Visnyk Lviv. Politekhniky [Lviv. Polytechnics Bulletin]*, 49, 61–70. Retrived from <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/118523> [in Ukrainian].
3. Romanko, V. A. (2025). *Sposib adaptivnoho navedennia vysokodynamichnoho aparata z vykorystanniam rezydualnoho neironnoho filtra Kalmana: zaiavka na vynakhid Ukrainy [Method of Adaptive Guidance of a High-Dynamic Platform Using a Residual Neural Kalman Filter. Patent Application of Ukraine]* a202506585 (Declared 29.12.2025; Under Examination) [in Ukrainian].
4. Romanko, V. A., & Sribnyi, O. M. (2025). Intehratsiia neironnoho filtra Kalmana v systemu navedennia vysokodynamichnykh aparativ [Integration of a Neural Kalman Filter into Guidance of High-Dynamic Platforms]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29, 125–139. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.09> [in Ukrainian].
5. Romanko, V. A., & Zhovnovatiuk, R. M. (2026). Rezydualnyi neironnyi filtr Kalmana dlia pidvyshchennia zavadostiikosti navihatsii BpLA [Residual Neural Kalman Filter for Improving UAV Navigation Robustness]. *Tekhnichna inzheneriia [Technical Engineering]*, 1 (97), 382–396. [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-382-396](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-382-396) [in Ukrainian].

6. Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82, 1, 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
7. Kalman, R. E., & Bucy, R. S. (1961). New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. *Journal of Basic Engineering*, 83, 1, 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>
8. Zimchuk, I. V., & Shapar, T. M. (2025). Parametrychnyi syntez alhorytmiv filtratsii dlia inertsialnykh navihatsiinykh system bezpilotnykh litalnykh aparativ []. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 28 (I), 37–50. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.04> [in Ukrainian].
9. Zimchuk, I. V., Shapar, T. M., & Kovba, M. V. (2024). Alhorytm filtratsii vymiriuvan akselerometrychnykh datchyktiv u bezplatformenykh inertsialnykh systemakh navihatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ [Filtering Algorithm of Accelerometrical Sensors Measurements in Platformless Inertial Navigation Systems Unmanned Aircraft]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 27 (I), 44–55. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.04> [in Ukrainian].
10. Kovbasiuk, S. V., Osadchuk, R. M., Romanchuk, M. P., & Naumchak, L. M. (2022). Alhorytm formuvannia naboru apriornykh danykh neuronnoi merezhi dlia obrobky tsyfrovyykh aeroznimkiv [An Approach to Forming a Prior Dataset of Neural Network for Processing Digital Aerial Photos]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 23, 77–88. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.06> [in Ukrainian].
11. Pilkevych, I. A., Tokar, A. M., Franzhi, O. V., & Loboda, R. I. (2021). Navchalno-trenavalna systema dlia pidhotovky operatoriv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv [A Training System for Preparing Operators of Aerial Vehicle Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 20, 83–97. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.08> [in Ukrainian].
12. Negru, S. A., Geragersian, P., Petrunin, I., & Guo, W. (2024). Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture. *Sensors*, 24, 3. Article 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>
13. Tonini, A., Castelli, M., Bates, J. S., & Lin, N. N., et al. (2024). Visual-Inertial Method for Localizing Aerial Vehicles in GNSS-Denied Environments. *Applied Sciences*, 14, 20. Article 9493. <https://doi.org/10.3390/app14209493>
14. Gallo, E., & Barrientos, A. (2023). Long-Distance GNSS-Denied Visual Inertial Navigation for Autonomous Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: SO(3) Manifold Filter Based on Virtual Vision Sensor. *Aerospace*, 10, 8. Article 708. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080708>

15. Aburasain, Y., Bilal, M., & Kim, K. (2024). Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems through Neural Network Integration with Kalman and Alpha-Beta Filters. *PLOS ONE*, 19, 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>

V. A. Romanko, D. V. Koval, O. V. Levchenko

APPLICATION OF RESIDUAL NEURAL KALMAN FILTER IN A UAV NAVIGATION MODULE

The paper considers a practical implementation of an external navigation module for an unmanned aerial vehicle based on a residual neural Kalman filter. The experimental platform is a compact single-board computing module of the Raspberry Pi-like class interacting with a flight controller; a visual channel, and a satellite navigation module. The study focuses not on flight tests but on a reproducible bench architecture, hardware-software integration, and a practical sensor configuration combining inertial, satellite, barometric, and visual channels.

It is shown that at the current stage it is sufficient to use the existing flight-controller software stack, a reproducible canonical bench contour, and a separate independent contour for further software development. The operability of the visual channel, communication with the flight controller; the barometric channel, and the diagnostic presence of the magnetometer is confirmed, whereas the satellite channel is confirmed only at the level of bench visibility without the requirement of a stable navigation fix. The selected platform is therefore suitable for the role of an external computational contour on which sensor-data processing and further development of the navigation module can be implemented.

The obtained results form a reproducible bench basis for transition to the next research stage associated with the first flight prototype. At the same time, actual flight, a standard working communication channel between the external module and the autopilot, and migration to another autopilot software stack are deliberately kept outside the scope of this paper.

Keywords: *residual neural Kalman filter; navigation module; unmanned aerial vehicle; single-board computing module; visual channel; satellite navigation; barometric channel.*

Ахтирцева Владислава Сергіївна – доктор філософії, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-0624-2284>

Наукові інтереси:

- соціальна інженерія;
- методи імітаційного моделювання;
- OSINT.

Бондаренко Юрій Леонідович – кандидат технічних наук, начальник факультету Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>

Наукові інтереси:

- оптимізація функціонування складних технічних систем;
- інформаційні технології багатокритерійної оптимізації систем та об'єктів;
- створення нових та вдосконалення наявних систем електрозабезпечення.

Бугайов Микола Вікторович – кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник начальника науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-0899-9843>

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Гуменюк Максим Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0001-6022-3052>

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;
- боротьба в електромагнітному середовищі;
- системи автоматичного керування;
- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Доска Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. <https://orcid.org/0000-0002-9874-8716>

Наукові інтереси:

- розвиток систем та комплексів зенітного ракетного озброєння;
- оптимізація процесів планування та управління ресурсами;
- удосконалення системи технічного забезпечення та ремонту.

Єгоров Володимир Олександрович – доктор філософії, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-1738-1375>

Наукові інтереси:

- радіомоніторинг супутникових систем зв'язку;
- інформаційні технології радіомоніторингу.

Автори випуску

Залевський Віктор Йосипович – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-1861-6084>

Наукові інтереси:

- апертурні антени;
- приймально-передавальні пристрої.

Запорожченко Юрій Іванович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0000-0407-163X>

Наукові інтереси:

- технічний аналіз сигналів;
- радіопеленгування, визначення положення джерел радіовипромінювання.

Згуря В'ячеслав Іванович – провідний експерт з акредитації Національного агентства з акредитації України. <http://orcid.org/0009-0008-5525-7037>

Наукові інтереси:

- оцінювання відповідності та метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань.

Зімчук Ігор Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0003-9372-5720>

Наукові інтереси:

- синтез алгоритмів оцінювання та управління для автоматизованих технічних систем.

Іщенко Дем'ян Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0001-9743-3889>

Наукові інтереси:

- дослідження складних інформаційних систем;
- моделювання операцій.

Іщенко Іван Анатолійович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0007-7150-1653>

Наукові інтереси:

- застосування мікропроцесорних пристроїв у системах електропостачання;
- застосування мікропроцесорів для модернізацій озброєння та військової техніки;
- дослідження шляхів оптимізації систем альтернативного живлення;
- математичне моделювання складних технічних систем.

Каптур Вадим Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник відділення перспективного розвитку Окремого спеціального центру електронної підтримки Командування Сухопутних військ Збройних Сил України. <https://orcid.org/0000-0003-4200-1151>

Наукові інтереси:

- телекомунікаційні системи та мережі;

- інформаційно-комунікаційні системи електронної підтримки;
- методи оцінювання ефективності та техніко-економічного аналізу.

Коваль Денис Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0009-5133-9542>

Наукові інтереси:

- комп'ютерні інформаційні технології;
- автоматизація технічних систем;
- безпілотні системи.

Котенко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0003-4177-6841>

Наукові інтереси:

- проблеми підвищення достовірності, скритності, завадозахищеності та інформативності в телекомунікаційних системах, системах радіолокації та технічного захисту інформації на основі використання складних широкосмугових радіосигналів.

Ларін Володимир Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, докторант штатний Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. <https://orcid.org/0000-0003-0771-2660>

Наукові інтереси:

- розвиток озброєння та військової техніки;
- підвищення ефективності систем криптографічного захисту інформації.

Левченко Олександр Віталійович – заслужений діяч науки і техніки України, доктор військових наук, професор, старший викладач кафедри Воєнної академії імені Євгенія Березняка. <https://orcid.org/0000-0001-6254-591X>

Наукові інтереси:

- моделювання операцій;
- безпілотні системи та комплекси;
- дослідження складних інформаційних систем.

Нагорнюк Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-7680-7201>

Наукові інтереси:

- методи цифрового оброблення та розпізнавання радіосигналів;
- проектування антен;
- радіоелектронна боротьба.

Оверчук Сергій Петрович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0009-0161-8076>

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;

Автори випуску

- вимірювальні системи;
- системи автоматичного керування;
- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів;
- нейронні мережі.

Омельчук Ігор Анатолійович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-4674-0058>

Наукові інтереси:

- вимірювальні системи;
- безпілотні літальні апарати;
- системи автоматичного керування.

Опенько Павло Вікторович – заслужений винахідник України, кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник кафедри Інституту авіації та протиповітряної оборони Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0000-0001-7777-5101>

Наукові інтереси:

- розвиток оперативного мистецтва Повітряних Сил;
- оптимізація процесів планування та управління ресурсами;
- розвиток складних технічних систем військового призначення;
- управління життєвим циклом озброєння та військової техніки.

Пількевич Ігор Анатолійович – заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0001-5064-3272>

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних систем та процесів;
- боротьба в електромагнітному середовищі;
- кіберзахист.

Піонтківський Петро Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-9103-5393>

Наукові інтереси:

- системи підтримки прийняття рішень;
- інформаційні системи військового призначення;
- безпілотні системи.

Подкалюк Єлизавета Петрівна – провідний інженер відділу систем управління в адаптивних технологіях Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України. <https://orcid.org/0009-0009-4236-2986>

Наукові інтереси:

- методи оцінювання ефективності та техніко-економічного аналізу.

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Державного університету «Житомирська політехніка». <http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрове оброблення сигналів і зображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Поплавець Сергій Іванович – доктор філософії, доцент, професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. <https://orcid.org/0009-0003-7538-0941>

Наукові інтереси:

- методика підготовки військових фахівців та організація освітнього процесу у військових закладах освіти;
- застосування методів дослідження операцій і мережевого планування у військовій діяльності;
- військова топографія та топогеодезичне забезпечення підготовки військ.

Прокопович Віктор Дмитрович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0006-3797-5303>

Наукові інтереси:

- інформаційні технології радіо та супутникового зв'язку.

Романько Вадим Анатолійович – доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0008-5749-284X>

Наукові інтереси:

- технології розробки програмного забезпечення;
- вебтехнології;
- штучні нейронні мережі;
- системи наведення та керування;
- завадостійкі навігаційні системи.

Рудницький Володимир Миколайович – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. <https://orcid.org/0000-0003-3473-7433>

Наукові інтереси:

- розвиток озброєння та військової техніки;
- підвищення ефективності систем криптографічного захисту інформації.

Самонюк Олександр Віталійович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0002-4177-6841>

Наукові інтереси:

- інформаційні технології радіо та супутникового зв'язку.

Сампір Ілона Анатоліївна – старший викладач кафедри Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0000-0003-3194-893X>

Наукові інтереси:

- організація та управління системою логістичного забезпечення військ;

Автори випуску

- оптимізація процесів планування та управління ресурсами;
- удосконалення освітнього процесу у вищих військових навчальних закладах.

Сампір Олександр Миколайович – доктор філософії, начальник логістики – заступник начальника Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-3564-1997>

Наукові інтереси:

- організація та управління системою логістичного забезпечення військ;
- оптимізація процесів планування та управління ресурсами;
- удосконалення освітнього процесу у вищих військових навчальних закладах.

Сидорчук Ольга Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-8767-9129>

Наукові інтереси:

- апертурні антени;
- приймально-передавальні пристрої.

Синицький Юрій Володимирович – старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту воєнної розвідки. <https://orcid.org/0009-0009-3658-358X>

Наукові інтереси:

- проблеми підвищення ефективності антенно-фідерних систем;
- підвищення достовірності, скритності, завадозахищеності та інформативності в телекомунікаційних системах.

Стрінада Віктор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідного відділу – заступник начальника науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-0604-7673>

Наукові інтереси:

- безпілотні системи та комплекси;
- математичне моделювання складних технічних систем.

Тарасенко Владислав Олександрович – ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0005-6267-9455>

Наукові інтереси:

- інформаційні технології радіозв'язку.

Ткач Андрій Олексійович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-7983-2285>

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;
- вимірювальні системи;
- системи автоматичного керування;
- цифрові системи керування та мікроконтролери;
- технології програмування.

Тристан Сергій Андрійович – інженер-програміст EPAM Systems, Inc. <https://orcid.org/0009-0004-5496-1517>

Наукові інтереси:

– підвищення ефективності систем криптографічного захисту інформації.

Франжі Олександр Вікторович – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0007-8828-5264>

Наукові інтереси:

– проектування антенних систем;
– космічні та геоінформаційні системи.

Фриз Володимир Петрович – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління розвитку спеціальних систем та інновацій Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0009-3267-5073>

Наукові інтереси:

– психологічні операції;
– інформаційні операції;
– технічні засоби психологічного впливу.

Ципоренко Валентин Григорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Державного університету «Житомирська політехніка». <http://orcid.org/0000-0002-6843-8960>

Наукові інтереси:

– радіомоніторинг;
– цифрове оброблення сигналів.

Чернявський Олег Юрійович – кандидат технічних наук, начальник кафедри Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». <https://orcid.org/0000-0002-9388-4604>

Наукові інтереси:

– застосування математичних методів і моделей у військових дослідженнях;
– оптимізація процесів планування та управління у військовій діяльності;
– тактико-спеціальна підготовка військових підрозділів.

Шапар Тетяна Миколаївна – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0008-0497-7675>

Наукові інтереси:

– синтез алгоритмів оцінювання та управління для автоматизованих технічних систем.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Обсяг статті повинен становити не більше 20 сторінок тексту формату А4, набраного в редакторі Microsoft Word шрифтом Times New Roman, розмір літер – 12 пт, стиль – normal (звичайний), міжрядковий інтервал – 1,2, абзац із відступом 0,8 см, інтервал перед та після абзацу – 0 пт, параметри сторінки: зліва – 2,25 см, справа – 2,25 см, зверху – 2,5 см, знизу – 2,25 см, від краю до верхнього та нижнього колонтитулів – 2,0 см; сторінки без нумерації.

Наукова праця має бути якісно відредагована та **підписана всіма авторами** (їх може бути **не більше чотирьох**) на звороті останнього аркуша із зазначенням: «У статті інформація з обмеженим доступом відсутня».

До статті додаються: **витяг з протоколу** засідання вченої (наукової, науково-технічної) ради установи (підрозділу) з обґрунтуванням доцільності опублікування роботи; **дані про авторів** із зазначенням прізвища, імені та по батькові (повністю), наукового ступеня, вченого звання (за наявності), посади, ORCID, наукових інтересів (обов'язково), контактного телефону, e-mail.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ РУКОПISУ

1. Індекс УДК зазначається в лівому верхньому куті перед відомостями про авторів.
2. Ініціали та прізвища авторів (кожен з нового рядка), їх ORCID – у правому куті (без наукового ступеня та вченого звання, шрифт напівжирний, без нахилу і підкреслювань).
3. Назва статті друкується великими літерами (шрифт напівжирний, без нахилу і підкреслювань) у центрі аркуша (без абзацу) без переносів і відокремлюється від тексту одним вільним рядком зверху та знизу.
4. Анотація українською мовою з ключовими словами друкується курсивом під назвою статті й відокремлюється від заголовка та тексту одним вільним рядком. Її обсяг разом із ключовими словами має становити не менше 1800 друкованих знаків (разом із пробілами).
5. Формули в статтях повинні бути набрані за допомогою стандартного редактора формул Microsoft Word як математичні вирази Office.
Усі формули розміщують у таблиці без обрамлення, у центрі, без абзацу. Номер формули зазначається посередині висоти другої колонки з виключкою вправо. Усі буквені позначення у формулах та рисунках, а також у тексті статті повинні бути однаковими за розміром і гарнітурою. Допускаються виділення напівжирним шрифтом, курсивом та підкреслювання за бажанням автора.
6. Рисунки до статті потрібно виконувати в редакторі Microsoft Word за допомогою функції «Створити малюнок». Не допускаються рисунки, що не піддаються редагуванню. Усі текстові написи на рисунках слід робити тільки в кадрах або текстових рамках. Розміри рисунка не повинні виходити за межі полів.
7. Стандартні таблиці слід виконувати в редакторі Microsoft Word. Вони повинні мати короткий заголовок.
8. Відповідно до постанови президії ВАК України від 15 січня 2003 року № 7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліку ВАК України» наукові статті, що подаються до друку, повинні містити такі необхідні елементи з їх зазначенням: постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи

практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано вирішення порушеної проблеми та на які спирається автор, а також обов'язково виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячена стаття; постановка завдання (формулювання цілей статті); виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки із цього дослідження та перспективи подальших розробок в окресленому напрямку. Список бібліографічних посилань (не менше 10 джерел) розміщується після статті в порядку згадування або в алфавітному порядку; посилання на літературу в тексті слід давати в квадратних дужках, наприклад, [1]. Бібліографічний опис оформлюється згідно з ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання».

9. Після списку бібліографічних посилань наводиться REFERENCES, оформлений у стилі APA.

10. Далі англійською мовою подаються: ініціали та прізвища авторів, назва статті, анотація та ключові слова (обсягом не менше ніж 1800 знаків разом із пробілами).

Матеріали, оформлені з відхиленням від зазначених вимог, редакційна колегія не розглядає.

Редколегія не несе відповідальності за викладену в статті інформацію. **За зміст, точність наведених даних, цитат, достовірність усього викладеного матеріалу, можливість відкритої публікації та дотримання вимог щодо академічної доброчесності відповідальність несуть автор (автори).**

Після отримання надісланих матеріалів текст статті буде перевірено на дотримання вимог щодо академічної доброчесності програмою StrikePlagiarism. У разі виявлення високого коефіцієнта подібності, редколегія залишає за собою право відхилити статтю.

Крім того, усі статті проходять процедуру незалежного рецензування.

Про позитивне або негативне рішення щодо прийняття статті буде повідомлено автору (авторам).

Публікація в збірнику наукових праць безкоштовна та не передбачає отримання автором (авторами) гонорару та авторського примірника. Установу, представником якої є автор (автори) статті, буде включено до списку адресатів, яким розсилається випуск збірника наукових праць.

Адреса редакційної колегії: Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова (науково-організаційний відділ), просп. Миру, 22, м. Житомир, 10004.

Телефон для довідок: +380 (41) 241-51-47 (дод. 46-675).

E-mail: nov.zvir@gmail.com

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ, ЗАСТОСУВАННЯ
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Збірник наукових праць

Випуск 30

Видавничий оригінал виготовлений
у науково-організаційному відділі ЖВІ

Редактор: **Л. М. Маришук**
Комп'ютерна верстка та макетування **Л. М. Маришук**
Дизайн і макет обкладинки **О. Ю. Тофанчук**

Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 7355 від 9 червня 2021 року
Підписано до друку 30.06.2026. Формат 60 × 84 / 8
Ум. друк. арк. 29,3. Тираж 55 прим. Зам. 474 опер.

Друкарня ЖВІ

10004, м. Житомир, просп. Миру, 22