

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

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

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

28 (I)

Житомир
2025

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 28 (I) / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2025. – 196 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28>

Наказами Міністерства освіти і науки України від 09.02.2021 № 157 та від 15.04.2021 № 420 збірник наукових праць включений у категорію «Б» Переліку наукових фахових видань України.

Науковий профіль видання:

122 – Комп'ютерні науки

125 – Кібербезпека

255 – Озброєння та військова техніка

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, протокол № 25 від 29.08.2025.

Головний редактор – ФРИЗ С. П., 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:

ВАСЮТА К. С., заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор (Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна);

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 (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, 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 (Державний університет «Житомирська політехніка», Україна);

МЕРЧИК Зигмунт, доктор технічних наук, професор (Військова технічна академія, Республіка Польща);

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);

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

ISSN 2076-1546

Наукові статті, включені до збірника наукових праць, пройшли рецензування.

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

ЗМІСТ

Бугайов М. В. Оптимізація швидкості польоту безпілотного літального апарата під час ведення радіомоніторингу	5
Могілянець Т. М., Трушков Г. В. Розроблення способу моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення гвинтових зубчастих зачеплень в озброєнні та військовій техніці	16
Гуменюк І. В., Рибчинський Д. А. Формалізована постановка наукового завдання з оптимізації польоту та управління безпілотних авіаційних комплексів під час використання повітряних ретрансляторів	26
Зімчук І. В., Шапар Т. М. Параметричний синтез алгоритмів фільтрації для інерціальних навігаційних систем безпілотних літальних апаратів	37
Поздняков В. В. Застосування алгоритму CFAR для виявлення гармонічних складових акустичних сигналів гвинтомоторних засобів повітряного нападу	51
Жураківський Б. М., Наумчак Л. М., Романчук М. П., Танцюра М. В. Аналіз похибки удосконаленого алгоритму обчислення координат об'єктів на матеріалах повітряної розвідки з безпілотного літального апарата	65
Нагорнюк О. А. Методика вибору параметрів періодичної, ковзної за частотою радіоперешкоди	77
Пулеко І. В., Чумакевич В. О., Ревенко В. Б., Ступак Д. Є., Свистунович І. В. Планування застосування безпілотних літальних апаратів розвідки методами навчання з підкріпленням та використанням функції щільності розподілу цілей	90
Охрімчук В. В., Охрімчук І. А. Метод побудови потенційного вектора кібератаки на основі теорії множин	104
Пількевич І. А., Омельчук І. А., Бондаренко Ю. Л., Білоус К. М. Показники маневреності ударних безпілотних літальних апаратів із фіксованим крилом як фактор забезпечення живучості	113
Скорецький М. С., Каптур В. А., Іваненко О. Г., Гаврилюк М. П. Методика оцінювання ефективності систем пеленгації джерел радіовипромінювання	126
Рихальський О. Р., Петраш С. В., Антонюк А. В. Моделювання антенних систем із високовольтних ліній електропередач для дослідження впливу їх випромінювання на формування PLHR-випромінювання в іоносфері	138
Тимчук С. В., Тарасенко В. О., Радущинський О. П. Методика визначення параметрів спектрограм радіосигналів для їх розпізнавання з використанням методів комп'ютерного зору	150

Сокульський О. Є., Чумакевич В. О., Топольськов Є. О. Стан розроблення й перегляду стандартів системи управління життєвим циклом озброєння та військової техніки	160
Іщенко Д. А., Стрінада В. В. Формування задуму ударного безпілотного авіаційного комплексу з урахуванням прогнозованого радіоелектронного прикриття об'єкта від ударів із повітря	177
Автори випуску	190

М. В. Бугайов

ОПТИМІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ПІД ЧАС ВЕДЕННЯ РАДІОМОНІТОРИНГУ

На сьогодні малорозмірні безпілотні літальні апарати все частіше використовують для ведення радіомоніторингу. Їх переміщення відносно джерела радіовипромінювання призводить до мінливості рівня прийнятого сигналу. Це пов'язано з дрібномасштабними завмираннями сигналу, які проявляються під час такого переміщення лише на половину довжини хвилі несучої частоти радіосигналу. Для зменшення впливу цього фактора на роботу алгоритмів, які використовують амплітудні методи пеленгування і через свою простоту часто застосовуються на безпілотних літальних апаратах, необхідно оптимізувати швидкість їх польоту. Метою статті є розроблення математичного апарату для розрахунку оптимальної швидкості польоту безпілотного літального апарата під час панорамного радіомоніторингу в умовах дрібномасштабних завмирань.

У ході досліджень як критерій оптимізації визначено максимізацію площі огляду засобу радіомоніторингу, що залежить від дальності виявлення джерел радіовипромінювання та швидкості польоту безпілотного літального апарата. Встановлено залежність між швидкістю його польоту та тривалістю вибірки сигналу для зменшення впливу завмирань на помилки оцінювання рівня прийнятого сигналу. Отримано аналітичний вираз, що пов'язує площу огляду безпілотного літального апарата зі швидкістю його польоту та частотою радіосигналу, описаного монотонною зростаючою функцією від швидкості польоту. Встановлено, що для виявлення максимальної кількості джерел радіовипромінювання безпілотний літальний апарат повинен рухатися з максимальною можливою швидкістю. При цьому тривалість вибірки сигналу розраховуємо для цієї швидкості та максимальної частоти сигналу. Запропоноване рішення дозволить за заданий час польоту безпілотного літального апарата виявляти максимальну кількість джерел радіовипромінювання.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; радіомоніторинг; радіочастотний спектр; швидкість польоту; інтервал аналізу.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сучасному етапі розвитку радіоелектронних систем малорозмірні безпілотні літальні апарати (БпЛА) все частіше використовують для вирішення найрізноманітніших завдань, зокрема для ведення радіомоніторингу (РМ) [1–6]. Особливістю виявлення та визначення місцеположення джерел радіовипромінювання (ДРВ) за допомогою розміщеного на БпЛА засобу РМ є мінливість параметрів прийнятого сигналу, спричинена переміщенням самого апарата відносно джерела. Це явище математично описують шляхом моделювання завмирань сигналу на трасі поширення [7–11]. Швидка зміна потужності прийнятого сигналу пов'язана із дрібномасштабними завмираннями, які проявляються під час переміщення

БпЛА лише на половину довжини хвилі несучої частоти радіосигналу. У такий спосіб просторовий розподіл напруженості електричного поля переходить у часову мінливість рівня прийнятого сигналу. Для зменшення впливу цього фактора на роботу алгоритмів, які використовують амплітудні методи і через свою простоту часто застосовуються на БпЛА [5], необхідно знижувати швидкість його польоту. Проте через обмежений час польоту БпЛА для огляду максимальної площі він повинен переміщуватися якомога швидше. У такому разі необхідно скорочувати тривалість вибірки сигналу, що призведе до зменшення дальності виявлення ДРВ. Отже, вибір швидкості польоту БпЛА РМ містить суперечності й потребує розроблення підходів для розрахунку його оптимального значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки суттєво зросла кількість наукових публікацій, присвячених дослідженням ведення РМ із використанням малорозмірних дронів. У [12] описано процес обльоту БпЛА навколо відомого ДРВ та вимірювання параметрів прийнятих сигналів. Проблему аналізу радіочастотного спектра (РЧС) для покращення його використання в ході організації радіоліній БпЛА для випадку негаусових перешкод описано в [13]. Шляхи оптимізації траєкторії польоту та перерозподілу частотного ресурсу під час ведення РМ запропоновано в [14]. У [15] наведено метод аналізу РЧС у разі використання великих мереж із БпЛА. Розподілену систему збирання даних про радіоелектронну обстановку із використанням групи БпЛА та їх передачу на центральний пункт оброблення інформації запропоновано в [16]. У [17] наведено підхід до планування польоту БпЛА РМ, що включає розподіл часу на аналіз радіоелектронної обстановки та передавання даних. У [18] розглянуто процес оптимізації аналізу РЧС для групи БпЛА.

Проте в розглянутих роботах основна увага приділена розподілу часу на аналіз РЧС та передавання зібраних даних у центр оброблення інформації. Питанням же оптимізації швидкості польоту БпЛА в умовах дрібномасштабних завмирань, що є критичним в умовах ведення РМ у міських та приміських районах, увага не приділяється.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення математичного апарату для розрахунку оптимальної швидкості польоту БпЛА під час ведення панорамного РМ в умовах дрібномасштабних завмирань.

Виклад основного матеріалу. За час аналізу сигналу в смузі частот ΔF середовище (умови поширення радіохвиль) не повинно дуже змінитися щодо дрібномасштабних завмирань, щоб не вносилися спотворення у виміряне значення потужності прийнятого сигналу. У такому разі БпЛА, що рухається зі швидкістю v , повинен переміститися на відстань, значно меншу половини довжини хвилі. Саме на цій відстані проявляються глибокі дрібномасштабні завмирання [9]. За такого підходу час аналізу (тривалість вибірки сигналу) T_a можна розрахувати відповідно до виразу [19]:

$$T_a \ll \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{c}{20vf_0}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі;

c – швидкість поширення радіохвиль;

f_0 – несуча частота радіосигналу.

На рис. 1 наведено залежність часу аналізу від швидкості польоту БпЛА для деяких значень несучої частоти сигналу (відповідно до виразу (1)). Якщо швидкість апарата може змінюватися в межах від 10 км/год до 200 км/год (2,8–55,5 м/с), то в разі сканування смуги частот у діапазоні від 300 МГц до 6 ГГц (нижня межа обрана з урахуванням прийнятних розмірів антен) мінімальний час аналізу не повинен перевищувати 45 мкс, а максимальний – 18 мс.

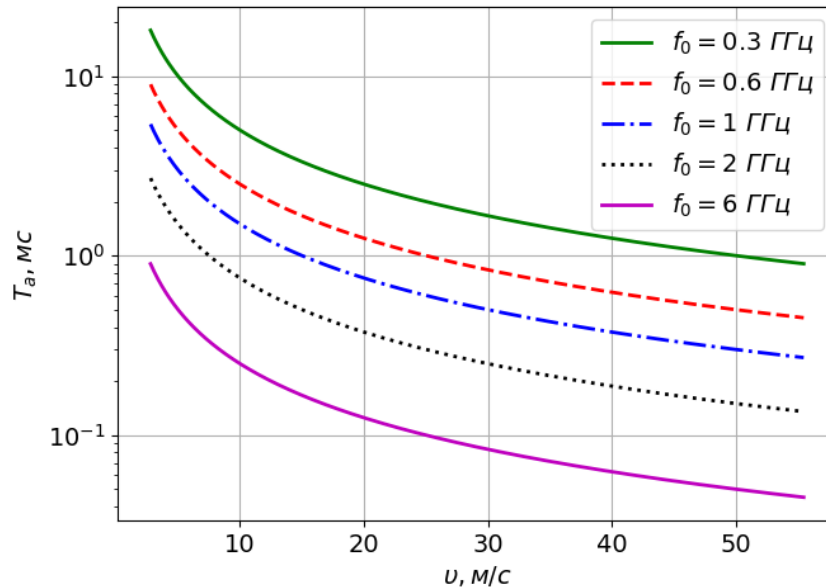


Рис. 1. Залежність часу аналізу від швидкості польоту БпЛА для деяких значень частоти радіосигналу

Якщо тривалість польоту БпЛА T_F не залежить від його швидкості, то велика швидкість польоту вимагатиме малих значень T_a . Це, у свою чергу, призведе до зниження значення відношення сигнал-шум (ВСШ) і зменшення дальності виявлення ДРВ R . Проте за фіксованої тривалості польоту та максимальної швидкості БпЛА пролетить максимальний шлях. За малої швидкості польоту час аналізу T_a буде більшим (відповідно до виразу (1)), що зумовить зростання ВСШ і дальності виявлення ДРВ. Однак шлях польоту БпЛА зменшуватиметься, тому його швидкість v є параметром, значення якого підлягає оптимізації.

Значення v будемо шукати за критерієм максимальної кількості ДРВ, які потенційно можуть бути виявлені засобом РМ. Оскільки їх кількість та розміщення апріорно невідомі, то оптимальне значення v повинне забезпечити максимальну площу огляду для заданої дальності виявлення R та фіксованого часу польоту БпЛА T_F (рис. 2). Значення цієї площі в припущенні, що висота польоту БпЛА h набагато менша дальності виявлення типового ДРВ R , наближено можна розрахувати за таким виразом:

$$S \approx 2RvT_F. \quad (2)$$

Цей вираз не містить значення частоти радіосигналу, оскільки дальність виявлення відображає лише енергетичну доступність ДРВ.

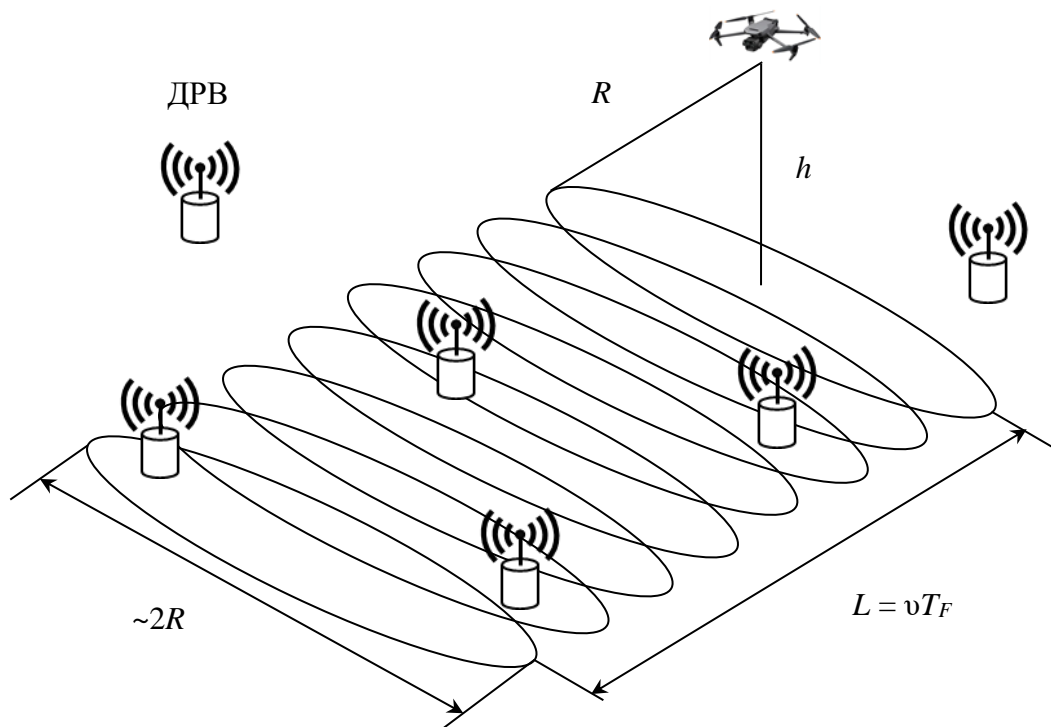


Рис. 2. Зона пошуку ДРВ

Дальність виявлення ДРВ R у разі заданих показників якості виявлення: ймовірності правильного виявлення P_D та ймовірності хибної тривоги P_F – є функцією від ВСШ q . Значення ВСШ також є функцією від часу аналізу (накопичення) сигналу T_a , що визначається швидкістю польоту БПЛА для заданої частоти радіосигналу (1). Тому дальність виявлення ДРВ у загальному випадку є функцією від швидкості БПЛА $R(v)$, яка залежить від обраного алгоритму виявлення.

Показники якості виявлення пов'язані зі значенням ВСШ, яке, у свою чергу, визначається як відношення потужності прийнятого сигналу P_r до потужності шуму в приймачеві P_n :

$$q = \frac{P_r}{P_n}. \quad (3)$$

Потужність прийнятого сигналу можна розрахувати, знаючи потужність випромінювання P_t ДРВ та дальність до засобу РМ на БПЛА, відповідно до такого виразу:

$$P_r = A_{ef} \frac{G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi R^2}, \quad (4)$$

де A_{ef} – ефективна площа антени засобу РМ,

$G(\theta, \gamma)$ – діаграма спрямованості антени для заданого азимута θ та кута місця γ .

Тоді ВСШ можна записати в такому вигляді:

$$q = A_{ef} \frac{G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi R^2 P_n}. \quad (5)$$

Визначимо із цього рівняння дальність виявлення R :

$$R = \sqrt{A_{ef} \frac{G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi P_n q}}. \quad (6)$$

В умовах апріорної невизначеності щодо структури сигналу ДРВ доцільно використати енергетичний детектор. Якщо розглядати типовий випадок виявлення випадкового нормально розподіленого сигналу на фоні білого гаусівського шуму, то для великих значень довжини вибірки N (більше 30) залежність між необхідною кількістю відліків і значенням ВСШ можна описати за допомогою такого рівняння [20–21]:

$$N = 2 \left(\frac{Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)(q+1)}{q} \right)^2, \quad (7)$$

де $Q(x)$ – компонента кумулятивної функції стандартного нормального розподілу $\Phi(x)$ – $Q(x) = 1 - \Phi(x)$.

Знайдемо з рівняння (7) значення ВСШ з урахуванням того, що об'єм вибірки N для заданої частоти дискретизації F_s становить $N = T_a F_s$:

$$q = \frac{Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)}{\sqrt{\frac{T_a F_s}{2}} + Q^{-1}(P_D)}. \quad (8)$$

Після підстановки виразу (8) у рівняння (6) отримаємо

$$R = \sqrt{\frac{A_{ef} G(\theta, \gamma) P_t \left(\sqrt{\frac{T_a F_s}{2}} + Q^{-1}(P_D) \right)}{4\pi P_n \left(Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D) \right)}}. \quad (9)$$

Введемо таке позначення:

$$k = \sqrt{\frac{A_{ef} G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi P_n \left(Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D) \right)}}. \quad (10)$$

Тоді вираз (9) можна записати у такому вигляді:

$$R = k \sqrt{\sqrt{\frac{T_a F_s}{2}} + Q^{-1}(P_D)}. \quad (11)$$

Знехтуємо другим доданком у підкореневому виразі, оскільки він значно менший, ніж перший. Після цього рівняння (11) можна записати у такій формі:

$$R \approx k \left(\frac{T_a F_s}{2} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (12)$$

Підставляючи у цей вираз T_a з рівняння (1), отримаємо

$$R = k \left(\frac{c F_s}{20 v f_0} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (13)$$

Залежність дальності виявлення від частоти дискретизації F_s сигналу в цьому виразі зумовлена тим, що в разі її збільшення зростає кількість відліків для заданого часу аналізу. Проте для програмно визначеного приймача частота дискретизації наближено дорівнює смузі пропускання, збільшення якої призводить до зниження його чутливості (зростання потужності шуму P_n у (9)) та зменшення дальності виявлення, тому в загальному випадку дальність виявлення не залежить від частоти дискретизації сигналу.

Як бачимо, дальність виявлення є монотонною спадною функцією від швидкості польоту БПЛА. Аналогічно, у разі фіксованої швидкості БПЛА, дальність польоту є монотонною зростаючою функцією від швидкості. Після підстановки виразу (13) у рівняння (2) отримаємо залежність площі огляду від швидкості польоту БПЛА:

$$S = 2k \left(\frac{c F_s}{20 f_0} \right)^{\frac{1}{4}} v^{\frac{3}{4}} T_F. \quad (14)$$

Значення цього виразу є монотонною зростаючою функцією від швидкості, тому із рівняння (14) випливає, що для огляду максимальної площі БПЛА повинен рухатися з максимальною швидкістю. Залежність від частоти сигналу в цьому виразі відображає той факт, що зі збільшенням частоти зростає просторова мінливість розподілу електромагнітного поля, спричинена дрібномасштабними завмираннями. Це призводить до зменшення часу аналізу сигналу T_a , що знижує ВСШ та дальність виявлення.

На рис. 3 наведено форму залежності площі огляду від значень швидкості польоту БПЛА та частоти радіосигналу для тривалості польоту 1 год. Як бачимо, максимальна площа огляду досягається за мінімальної частоти радіосигналу та максимальної швидкості польоту. У ході ведення РМ за допомогою БПЛА аналіз РЧС проводиться шляхом сканування, тобто в кожній точці (локальній області) простору відбувається

переналаштування радіоприймального пристрою на нову частоту з кроком, що дорівнює смузі його пропускання, причому цей перехід повинен відбуватися протягом кількох мікросекунд. Очевидно, що змінювати швидкість польоту БПЛА в таких умовах для забезпечення виконання умови (1) практично неможливо, тому доцільно обрати час аналізу кожної частоти, що відповідає максимальному значенню частоти приймача. А БПЛА в цьому разі повинен переміщуватися з максимально можливою швидкістю. У таких умовах час на сканування всієї смуги частот становитиме

$$T_{\Delta\Pi} = \frac{(f_{\max} - f_{\min})c}{20F_s v_{\max} f_{\max}}, \quad (15)$$

де f_{\min} та f_{\max} – мінімальна та максимальна робочі частоти приймача;
 v_{\max} – максимальна швидкість польоту БПЛА.

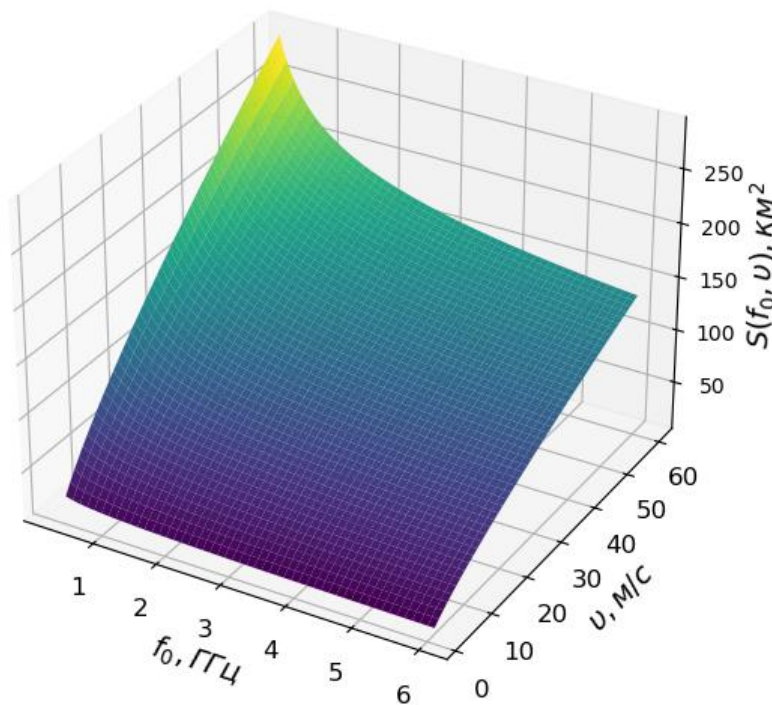


Рис. 3. Залежність площі огляду від швидкості польоту БПЛА та частоти радіосигналу

Для частоти дискретизації сигналу 20 МГц мінімальна кількість відліків, що підлягають аналізу (для тривалості інтервалу аналізу 45 мкс), становитиме 900, а максимальна кількість відліків (для тривалості інтервалу аналізу 18 мс) – 360000. Для ймовірності правильного виявлення 0,9 та ймовірності хибної тривоги 0,001 виявлення сигналу енергетичним детектором для заданих об'ємів вибірки сигналу можливе в разі значень ВСШ -20 дБ та -33 дБ відповідно, за умови, що ширина спектра сигналу дорівнює смузі пропускання приймача. Якщо сигнал має вузький спектр, то його можна виявити з такими ж показниками якості за вищих значень ВСШ, що еквівалентно зменшенню дальності виявлення.

Для швидкості польоту БПЛА 200 км/год за використання радіоприймального пристрою з верхньою частотою 6 ГГц виявлення сигналу можливе в разі ВСШ -20 дБ і вище в смузі, що дорівнює ширині спектра сигналу.

Висновки. У ході проведених досліджень розроблено підхід до розрахунку оптимальної швидкості польоту БПЛА та тривалості вибірки сигналу під час ведення РМ в умовах дрібномасштабних завмирань. Запропоноване рішення дозволить за заданий час польоту виявляти максимальну кількість ДРВ. Розроблений математичний апарат може бути реалізований під час розроблення сучасних систем РМ для БПЛА. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у побудові математичної моделі прийнятого сигналу та відповідних методів їх оброблення у разі ведення РМ заданої ділянки місцевості із використанням кількох БПЛА. Це дасть змогу реалізувати рознесене приймання радіосигналів і зменшити негативний вплив завмирань.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Chen F., Rezatofighi S. H., Ranasinghe D. C. GyroCopter: Differential Bearing Measuring Trajectory Planner for Tracking and Localizing Radio Frequency Sources // Computer Science. Robotics. 2024. 9 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13081>
2. Dressel L., Kochenderfer M. J. Pseudo-bearing Measurements for Improved Localization of Radio Sources with Multirotor UAVs // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, QLD, Australia, 2018. P. 6560–6565. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460734>
3. Non-myopic Sensor Path Planning for Emitter Localization with a UAV / Hoffmann F., Schily H., Krestel M. et al. // 26th International Conference on Information Fusion. 2023. 8 p. <https://doi.org/10.23919/FUSION52260.2023.10224174>
4. Dressel L., Kochenderfer M. J. Hunting Drones with Other Drones: Tracking a Moving Radio Target // International Conference on Robotics and Automation. Montreal, QC, Canada, 2019. P. 1905–1912. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794243>
5. UAV-born Narrowband Radar Complex for Direction Finding of Radio Sources / S. Zhyla, A. Popov, E. Tserne et al. // 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies. Athens, Greece, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416434>
6. Kwon H., Guvenc I. RF Signal Source Search and Localization Using an Autonomous UAV with Predefined Waypoints / Zhyla S., Popov A., Tserne E. et al. // IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Florence, Italy, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200783>
7. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. (2nd ed.). Prentice Hall, 2003. 953 p.
8. Recommendation ITU-R P.1406-2 (07/2015) Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands P Series Radiowave Propagation. 13 p.
9. Goldsmith A. Wireless communications. (2nd ed.). Stanford University, 2020. 597 p.
10. Lu S., May J., Haines R. Efficient Modeling of Correlated Shadow Fading in Dense Wireless Multi-hop Networks // In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2014. P. 311–316. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6951986>

11. Karagiannis G. A., Panagopoulos A. D. Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems // *Future Internet*, MDPI. 2019. Vol. 11 (5). P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/fi11050106>
12. Liu X., Guan M., Zhang X., Ding H. Spectrum Sensing Optimization in an UAV-Based Cognitive Radio // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 44002–44009. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862424>
13. Zhang J. et al. Spectrum and Energy Efficient Multi-antenna Spectrum Sensing for Green UAV Communication // *Digital Communications and Networks*. 2023. Vol. 9, Iss. 4. P. 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.09.017>
14. Yan L., Cai Y., Wei H. Unmanned Aerial Vehicle-assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC // *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2024. Iss. 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>
15. Wang W., Peng J. Cooperative Spectrum Sensing Algorithm for UAV Based on Deep Learning // *IEEE 96th Vehicular Technology Conference*. London, United Kingdom, 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10013034>
16. Tekbiyik K., Kurt G. K., Lesage-Landry A. Federated Learning for UAV-Based Spectrum Sensing: Enhancing Accuracy Through SNR-Weighted Model Aggregation // *Computer Science*. 2024. 6 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.11159>
17. Gul N., Kim S. M., Ali J., Kim J. UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks // *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18 (9). 36 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
18. Wu J. et al. Optimisation of Virtual Cooperative Spectrum Sensing for UAV-based Interweave Cognitive Radio System // *IET Commun.* 2021. Vol. 15. P. 1368–1379. <https://doi.org/10.1049/cmu2.1210>
19. Бугайов М. В. Математична модель прийнятого сигналу панорамним засобом радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті // *Всеукр. міжвідомчий наук.-техн. збірник “Радіотехніка”*. Харків : ХНУРЕ, 2024. № 219. С. 82–91. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09>
20. Kay S. M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection theory*, Vol. 2. Prentice Hall, New Jersey, 1998. 576 p.
21. Zhang W. *Handbook of Cognitive Radio* // Springer. 2019. 2034 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1394-2>

Стаття надійшла до редакції 03.02.2025.

REFERENCES

1. Chen, F., Rezatofghi, S. H., & Ranasinghe, D. C. (2024). GyroCopter: Differential Bearing Measuring Trajectory Planner for Tracking and Localizing Radio Frequency Sources. *Computer Science. Robotics*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13081>
2. Dressel, L., & Kochenderfer, M. J. (2018). Pseudo-bearing Measurements for Improved Localization of Radio Sources with Multirotor UAVs. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, QLD, Australia, (pp. 6560–6565). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460734>

3. Hoffmann, F., Schily, H., & Krestel, M. et al. (2023). Non-myopic Sensor Path Planning for Emitter Localization with a UAV. In *26th International Conference on Information Fusion*. <https://doi.org/10.23919/FUSION52260.2023.10224174>
4. Dressel, L., Kochenderfer, M. J. (2019). Hunting Drones with Other Drones: Tracking a Moving Radio Target. In *International Conference on Robotics and Automation*. Montreal, QC, Canada. (pp. 1905–1912). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794243>
5. Zhyla, S., Popov, A., Tserne, E. et al. (2023). UAV-born Narrowband Radar Complex for Direction Finding of Radio Sources. In *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*. Athens, Greece. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416434>
6. Kwon, H., & Guvenc, I. (2023). RF Signal Source Search and Localization Using an Autonomous UAV with Predefined Waypoints. In *IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. Florence, Italy. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200783>
7. Sklar, B. (2003). *Digital Communications. Fundamentals and Applications*. (2nd ed.). Prentice Hall.
8. *Recommendation ITU-R P.1406-2*. (07/2015). Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands P Series Radiowave Propagation.
9. Goldsmith, A. (2020). *Wireless Communications*. (2nd ed.). Stanford University.
10. Lu, S., May, J., & Haines, R. (2014). Efficient Modeling of Correlated Shadow Fading in Dense Wireless Multi-hop Networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. (pp. 311–316). <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6951986>
11. Karagiannis, G. A., & Panagopoulos, A. D. (2019). Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems. *Future Internet, MDPI*, 11 (5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/fi11050106>
12. Liu, X., Guan, M., Zhang, X., & Ding, H. (2018). Spectrum Sensing Optimization in an UAV-Based Cognitive Radio. *IEEE Access.*, 6, 44002–44009. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862424>
13. Zhang, J. et al. (2023). Spectrum and Energy Efficient Multi-antenna Spectrum Sensing for Green UAV Communication. *Digital Communications and Networks*, 9, 4, 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.09.017>
14. Yan, L., Cai, Y., & Wei, H. (2024). Unmanned Aerial Vehicle-assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>
15. Wang, W., & Peng, J. (2022). Cooperative Spectrum Sensing Algorithm for UAV Based on Deep Learning. In *IEEE 96th Vehicular Technology Conference*. London, United Kingdom. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10013034>
16. Tekbıyık, K., Kurt, G. K., & Lesage-Landry, A. (2024). Federated Learning for UAV-Based Spectrum Sensing: Enhancing Accuracy Through SNR-Weighted Model Aggregation. *Computer Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.11159>
17. Gul, N., Kim, S. M., Ali, J., & Kim, J. (2023). UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *PLoS ONE*, 18 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>

18. Wu, J. et al. (2021). Optimisation of Virtual Cooperative Spectrum Sensing for UAV-based Interweave Cognitive Radio System. *IET Commun*, 15, 1368–1379. <https://doi.org/10.1049/cmu2.1210>
19. Buhaiov, M. V. (2024). Matematychna model pryiniatoho syhnalu panoramnym zasobom radiomonitorynhu na bezpilotnomu litalnomu aparati [Mathematical Model of the Received Signal by Panoramic Means of Radio Monitoring on an Unmanned Aerial Vehicle]. *Vseukr. mizhvidomchyi nauk.-tekhn. zbirnyk "Radiotekhnika" [All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection "Radio Engineering"]*, 219. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09> [in Ukrainian].
20. Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection theory*. Vol. 2. Prentice Hall, New Jersey.
21. Zhang, W. (2019). *Handbook of Cognitive Radio*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1394-2>

M. V. Buhaiov

UNMANNED AERIAL VEHICLE FLIGHT SPEED OPTIMIZATION FOR SPECTRUM SENSING

Nowadays, small unmanned aerial vehicles are increasingly used for spectrum sensing. The movement of the unmanned aerial vehicle relative to the radio source leads to variability in the level of the received signal. This is due to small-scale signal fading, which occurs when the unmanned aerial vehicle moves by only half the wavelength of the radio signal carrier frequency. To reduce the influence of this factor on the characteristics of algorithms that use amplitude methods and are often used on unmanned aerial vehicles due to their simplicity, it is necessary to optimize the speed of its flight. The aim of the article is to develop a mathematical apparatus for calculating the optimal unmanned aerial vehicles flight speed for wideband spectrum sensing in conditions of small-scale fading. In the course of the research, the optimization criterion was determined to be the maximization of the scanning area, which depends on the range of detection of radio sources and the unmanned aerial vehicles flight speed. The dependence between the unmanned aerial vehicles flight speed and the duration of signal sample is established to reduce the effect of fading on errors in estimating the received signal strength.

An analytical expression has been obtained that relates the scanning area of the unmanned aerial vehicles to its flight speed and the frequency of the radio signal, which is described by a monotonous increasing function of the flight speed. It has been established that in order to detect the maximum number of radio sources, a unmanned aerial vehicle should move at maximum speed. The signal sampling duration is calculated for a given speed and maximum signal frequency. The proposed solution will allow detecting the maximum number of radio sources for a given unmanned aerial vehicle flight time. The developed mathematical apparatus can be implemented in the development of modern radio monitoring systems for unmanned aerial vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; spectrum sensing; radio frequency spectrum; flight speed; sensing interval.*

Т. М. Могилянець, Г. В. Трушков

РОЗРОБЛЕННЯ СПОСОБУ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФІЛЮ БАГАТОЗАХІДНОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ЗУБЧАСТИХ ЗАЧЕПЛЕНЬ В ОЗБРОЄННІ ТА ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНІЦІ

Із появою новітніх технологій виготовлення військової техніки та озброєння, а також розвитком сучасної обчислювальної техніки перед конструкторами постає необхідність розроблення нових, більш ефективних способів моделювання спряжених криволінійних поверхонь кінематичних пар зубчастого зачеплення без інтерференції. У статті розглянуто питання створення способу моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення гвинтових зубчастих зачеплень в озброєнні та військовій техніці. Цей спосіб моделювання спрямований на вдосконалення оброблення зубчастих спряжених криволінійних зачеплень, які використовуються в підйомних механізмах гармат, поворотних механізмах башт танків і самохідних артилерійських установок.

Надійність і довговічність сучасних машинобудівних виробів, які містять велику кількість елементів зі складними спряженими криволінійними поверхнями зубчастого зачеплення, значною мірою визначаються точністю їх виготовлення. У практиці моделювання кінематичних пар спряжених криволінійних поверхонь часто виникають певні труднощі, тісно пов'язані зі створенням зубчастих виробів військової техніки та озброєння. Саме тому актуальним є розроблення ефективного способу моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення спряжених криволінійних зубчастих поверхонь, що дозволяють уникнути інтерференції ще на стадії проєктування виробу, вузлів і агрегатів озброєння та військової техніки. Запропонований спосіб сприятиме вдосконаленню процесу моделювання, а також підвищенню точності оброблення зубчастих коліс та загальної продуктивності виробничих процесів пропонованою фрезною.

Ключові слова: *зубчасте зачеплення; технічне рішення; технологічний процес моделювання профілю; спряжена поверхня; параметризація; процес розроблення; архімедова спіраль; кінематична пара; інтерференція; озброєння та військова техніка.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сьогодні потребує ретельного дослідження технологічний процес розроблення нових способів моделювання профілю ріжучого інструмента гвинтової криволінійної поверхні, а саме багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення зубчастих спряжених зачеплень кінематичних пар підйомного механізму гармат, поворотних механізмів башти танка та самохідних артилерійських установок.

Однією з найважливіших проблем під час оброблення криволінійної поверхні профілю ріжучого інструмента багатозахідної черв'ячної фрези є виключення інтерференції. Якщо вона досить велика, то оброблення ріжучого інструмента спричиняє підрізання кромки фрези (зниження точності, неможливість подальшого оброблення).

© Т. М. Могилянець, Г. В. Трушков, 2025

Унаслідок цих деформацій у разі великої інтерференції зубів відбувається проскок. Таке оброблення криволінійної поверхні профілю ріжучого інструмента багатозахідної черв'ячної фрези неприпустима, оскільки вона призводить до збільшення динамічних навантажень та зношування, які засмічують мастило, що може зумовити псування обробного механізму з виготовлення ріжучого інструмента.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення дослідження закладені в роботі [1]. Явище інтерференції описано так: “Інтерференція настає тоді, коли якась частина простору виявляється всередині об’ємів двох тіл одночасно”. Якщо одне з тіл є різальним інструментом, а інше – деталь, то інтерференція спричиняє підрізання та зниження точності під час оброблення виробу. Якщо це тіла, то виготовлення ріжучого інструмента призводить до зрізу зубів. У [2] запропоновано інше визначення: “Інтерференцією називається будь-який неправильний дотик профілів поза активними ділянками лінії зачеплення, тобто явище, коли траєкторія кромки одного зуба у відносному русі перетинає профіль спряженого зуба”. Проте щодо інтерференції передбачалася побудова великої кількості аксоїдів, що робить відповідні дослідження недоцільними в практичному використанні.

В основі утворення спряжених гвинтових криволінійних поверхонь лежить теорема професора Подкоритова А. М. [3, 4], із якої випливає, що поверхні Σ_A і Σ_B спряжені, якщо кожна з них утворена відповідним відносним рухом Φ_A / Σ_A і Φ_B / Σ_B конгруентних посередників $\Phi_A = \Phi_B$. Поверхня Σ_A і поверхня посередника Φ_A є взаємообвідними з лінійним контактом $l^1(l^1_2)$ [5].

Формулювання завдання дослідження. Метою цього дослідження є розроблення способу моделювання профілю ріжучого інструмента багатозахідної черв'ячної фрези для оброблення гвинтових зубчастих зачеплень, спряжених із гвинтовою поверхнею, що обробляється, у спряжених кінематичних парах механізмів, застосовуваних в озброєнні та військовій техніці. Для її досягнення розглянемо архімедову й логарифмічну спіралі та пряму лінію.

Виклад основного матеріалу. Основою для виконання завдання є насамперед створення рішення для виготовлення оброблювальних інструментів, на що і спрямовані пропонувані дослідження. На практиці в моделюванні виробів із криволінійним спряженням поверхонь часто виникають проблеми [5], тісно пов'язані з авіаційною, військовою технікою, машинобудуванням, верстатобудівною та інструментальною галузями. Із появою новітніх технологій виготовлення військової техніки та озброєння, які ґрунтуються на обробленні виробів в автоматизованих виробничих комплексах, з урахуванням особливостей сучасної обчислювальної техніки перед конструкторами постає необхідність розроблення нових, більш складних методів моделювання спряжених поверхонь без інтерференції [6]. Це дозволить не лише скоротити час на проектування, підвищити надійність, довговічність і точність розрахунково-графічних процесів, але й надасть можливості для технічного моделювання досліджуваних виробів із

застосуванням інноваційних технологічних підходів через комп'ютерні технології. Такий розвиток сприяє значному підвищенню обчислювальних і графічних можливостей сучасної комп'ютерної техніки, а також засобів проєктування та аналітичного аналізу [7]. У результаті відкриваються нові перспективи для моделювання профілів ріжучих інструментів у ході створення кінематичних пар для озброєння та військової техніки, що дозволяє усунути інтерференцію ще на етапі проєктування.

Після вивчення різних об'єктивних методів моделювання профілю ріжучих інструментів, а саме багатозахідних черв'ячних фрез, було виявлено, що чинні методи не є достатньо практичними у виробництві, тому для виготовлення багатозахідної черв'ячної фрези із необхідною точністю задаються параметри контактної поверхні зачеплення з наперед визначеними умовами [8, 9], що дозволяє виключити інтерференцію під час оброблення деталей. У кожній формі виробничого технологічного процесу інструмент визначає не лише технічну послідовність дій, а й форму оброблюваної деталі. Покращення інженерних процесів неможливе без належної уваги до якості інструментів. Так, наприклад, застосування багатозахідних ріжучих інструментів, зокрема черв'ячних фрез, не лише оптимізує технологічні операції, але й забезпечує вищу точність і продуктивність у виготовленні деталей.

У практиці розрахунку ріжучих інструментів найбільш загальним і вживаним є випадок обертання тіл навколо осей, що схрещуються. Відносний рух об'єктів, як відомо, є гвинтовим [1] і характеризується осями та параметрами гвинтової лінії.

Однією з ключових проблем ході профілювання ріжучих інструментів є точне визначення форми вихідної гвинтової робочої поверхні багатозахідної черв'ячної фрези, яка має відповідати оброблюваній гвинтовій поверхні [3]. Черв'ячні фрези належать до найбільш поширених інструментів у сфері металообробки. Жоден інший інструмент не демонструє такого різноманіття типів, форм і сфер використання, як фрези. Їх суттєвою перевагою є можливість ефективного профілювання деталей.

За основу розроблення моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези на базі теорії архімедової спіралі взято логарифмічну спіраль і пряму лінію. Однак варто зауважити, що на практиці перевагу надають саме архімедовій спіралі. Кожна крива профілю повинна забезпечувати достатні задні кути до всіх точок ріжучої кромки профілю і при цьому залишатися досить великою, щоб задовольнити технічний процес різання, навіть у разі багаторазового шліфування. У цьому сенсі спіраль Архімеда показує досить задовільні результати (рис. 1).

Рівняння архімедової спіралі в полярній системі координат має такий вигляд (рис. 1):

$$\zeta = b\Theta,$$

де ζ та Θ – радіус-вектор і полярний кут в радіанах даної точки спіралі;

b – коефіцієнт (пропорційності), що характеризує розміри спіралі.

Із формули видно, що приріст кута повороту прямо пропорційний приросту радіуса-вектора. Підйом спіралі (збільшення радіуса-вектора за один оберт) – це величина постійна.

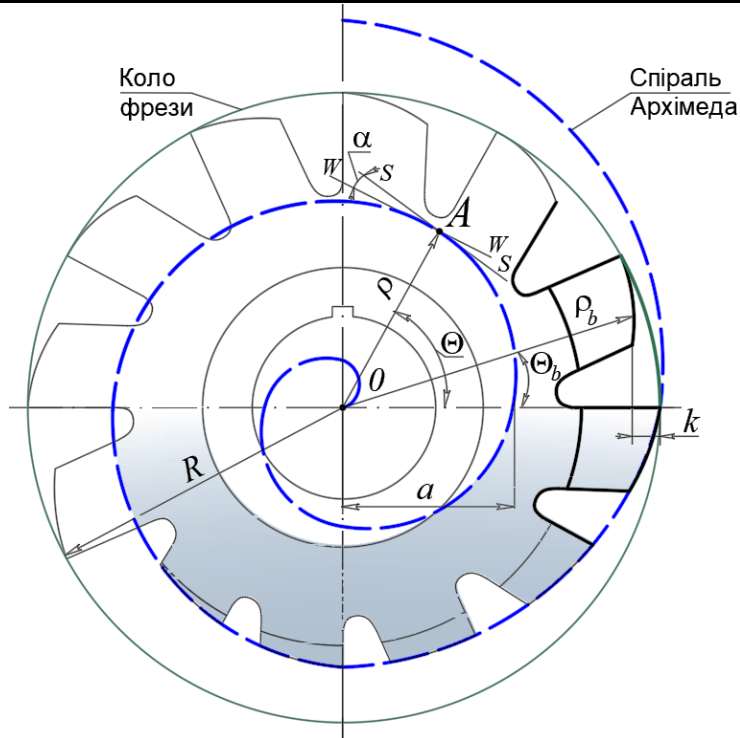


Рис. 1. Архімедова спіраль як крива для затилуваного зуба

Для кута $\Theta = \frac{\alpha}{2\pi}$ радіус-вектор $\zeta = \alpha$, тоді $b = \alpha / 2\pi$.

Відповідно, рівняння спіралі можна записати в такий спосіб:

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\pi} \Theta.$$

Щодо зуба фрези, то рівняння архімедової спіралі за вершиною можна записати як

$$\zeta_b = R - \frac{\alpha}{2\pi} \Theta_b,$$

де R – зовнішній діаметр фрези.

Задній кут лежить між дотичною до спіралі $S - S_s$ і дотичною до кола $W - W_s$, проведеними в точці A (рис. 2).

Користуючись формулою з диференціальної геометрії, можемо зазначити таке:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\zeta}{\zeta d\Theta}; \frac{d\zeta}{d\Theta} = \frac{\alpha}{2\pi}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{\alpha}{2\pi\zeta} = \frac{1}{\Theta},$$

а також

$$\operatorname{ctg} \alpha = \Theta.$$

Величина підйому спіралі становить

$$a = kz,$$

де k – величина підйому спіралі, відповідна кроку зубів, або величина затилування;

z – кількість зубів фрези.

Отже,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{kz}{2\pi\zeta}.$$

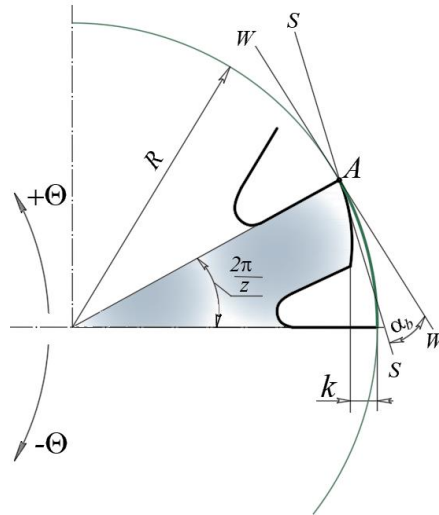


Рис. 2. Визначення заднього кута

Вважаючи, що $\zeta = R$, знаходимо залежність між заднім кутом на вершині зуба α_B , радіусом, кількістю зубів і величиною затилування фрези:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{kz}{2\pi R},$$

звідси визначимо величину затилування:

$$k = \frac{\pi D}{z} \operatorname{tg} \alpha_B,$$

де D – діаметр фрези.

Для повідомлення затилувальних рухів у супорті верстата встановлено кулачок, величина спадання якого дорівнює величині затилування, що відноситься до повного оберту кулачка, а на фрезі – до центрального кута $360^\circ/z$. На кожному кулачку позначається величина спадання.

Як відомо, задній кут у вимірюваній площині зазвичай знаходиться між площиною, дотичною до площини основи зуба, і площиною, дотичною до тієї, що утворена обертанням ріжучої кромки (наприклад, вершини зуба). Обидві площини є дотичними, проведенними до однієї точки, і вимірювана площина через цю дотичну може бути проведена нескінченно.

Проте нас цікавлять лише три площини вимірювання (рис. 3):

а) PP – площина, перпендикулярна до осі отвору фрези;

б) NN – площина, перпендикулярна до проєкції бічної ріжучої кромки на площину, перпендикулярну до передньої поверхні;

в) OO – площина, паралельна до осі отвору.

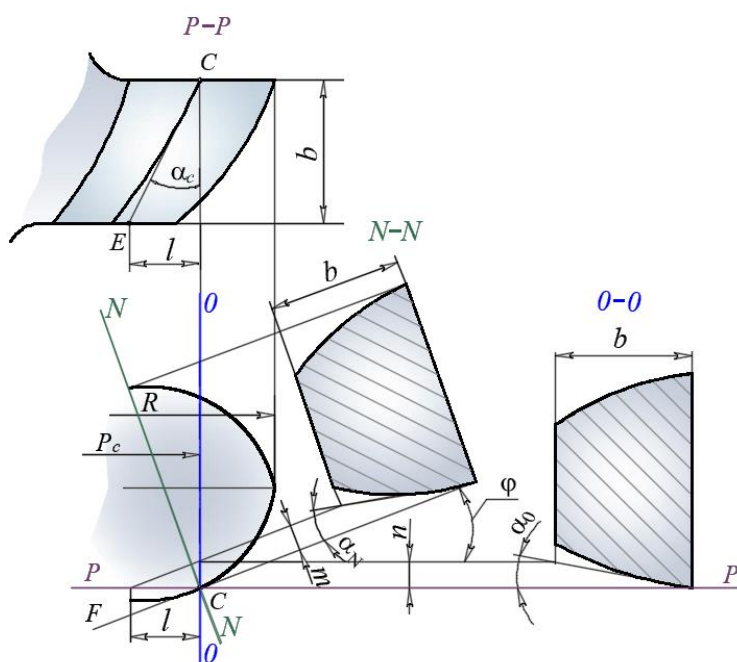


Рис. 3. Визначення задніх кутів у різних площинах для довільної точки зуба фрези

До затилуваної поверхні дотична площина може бути визначена двома дотичними до однієї і тієї ж точки з прямими, розташованими в цій площині. Одна з них – пряма CE , дотична до архімедової спіралі, інша – CF , дотична до кривої профілю зуба.

Дотична площина до поверхні циліндра може бути задана також двома дотичними до тієї ж точки C прямими, розташованими в цій площині. Одна з них – пряма CH , перпендикулярна до радіуса-вектора (наприклад, ζC для точки C), інша – CF , дотична до кривої профілю зуба.

Позначимо задні кути: α_C – у вимірюваній площині PP , α_0 – у площині OO , α_N – у площині NN , крім того, α_B – кут на вершині.

Кут α_C визначаємо таким чином (рис. 3):

$$\operatorname{tg} \alpha_C = \frac{R}{\zeta_C} \operatorname{tg} \alpha_B.$$

Кут α_0 знаходимо в такий спосіб: (рис. 3):

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{n}{b}; n = \operatorname{tg} \varphi; b = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha_C}.$$

Після підстановки маємо

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \operatorname{tg} \alpha_C \operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{\zeta_C} \operatorname{tg} \alpha_B \operatorname{tg} \varphi,$$

де φ – кут між дотичною до профілю та віссю профілю (тобто прямої, перпендикулярної до осі фрези).

Кут α_N визначаємо як

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \frac{m}{b}; b = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha_C}; m = l \sin \varphi.$$

Після підстановки отримуємо

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha_C \sin \varphi = \frac{R}{\zeta_C} \operatorname{tg} \alpha_B \sin \varphi.$$

Останнє рівняння показує, що кут α_N є мінімальним за своєю величиною порівняно із заднім кутом в інших перетинах. Щоправда, різниця між α_0 і α_N практично мала і для максимального значення $\alpha_B = 15^\circ$ маємо $\alpha_N = 0,97\alpha_0$. Проте для розрахунку кута α_B користуємося величиною α_N .

Зі зменшенням кута φ кут α_N стає меншим і на ділянках ріжучих кромки із $\varphi = 0$ задній кут α_N дорівнює нулю. Під час розрахунку зазвичай задається мінімально допустимим заднім кутом α_N на бічних кромках у межах 2° – 3° і лише у виняткових випадках його можна знизити до 1° – $1,5^\circ$.

Потім аналітичним шляхом або графічно визначаємо кут φ для найсприятливішої точки бічної кромки, тобто мінімальне його значення. Якщо воно виявляється менше 5° , що зрізає частку евольвенти, то для фрез із напівкруглими опуклими й увігнутими профілями передбачені скоси під кутом 10° .

Знаючи φ і α_N , знаходимо задній кут α_B на вершині зуба фрези згідно з такою формулою:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{\zeta_C \operatorname{tg} \alpha_N}{R \sin \varphi}.$$

Після цього знаходимо величину затилування та підбираємо з можливих розмірів кулачків найбільш відповідний для визначеного округлення величини його спадання.

Для контролю моделювання профілю багатозахідної черв'ячної фрези, у разі профілювання шаблону, необхідно визначити перетин поверхні, що лежить в площині, перпендикулярній до гвинтової паралелі, на початковому циліндрі з діаметром.

Профіль шаблону можна визначити графічно та аналітично.

На сьогодні багатозахідні черв'ячні фрези є найбільш продуктивними, їх широко застосовують у військовій техніці та озброєнні для оброблення багатьох деталей у масовому й серійному виробництві.

Висновки. Запропонований спосіб моделювання ґрунтується на теорії спряжених поверхонь, які дають змогу визначити конфігурацію ріжучих кромek зубонарізних інструментів, що гарантують відсутність інтерференції. Щодо зубчастих коліс, то це означає відсутність підрізання з потрібним діапазоном кількості зубців коліс передачі із застосуванням нестандартних значень модуля, які визначаються. Розроблення моделювання профілю ріжучого інструмента описаним вище способом надасть можливість визначити криволінійну похибку ріжучого інструмента, що дозволить враховувати явище інтерференції, оброблювати нові зубчасті криволінійні спряжені поверхні зачеплення на виробництві, а також здійснювати ремонт військової техніки в польових умовах, що сприятиме пришвидшенню процесу введення в стрій зразка озброєння.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Podkorytov A. Theoretical Bases of Conjugate Quazihelical Surfaces, Excluding Interference // 10th Intern. Conf. on Engineering Design Graphios and Descriptive Geometry. Texas, USA, Austin. 2002. Vol. 1. P. 43–47.
2. Подкоритов А. М., Ісмаїлова Н. П. Загальний ітераційний метод виключення інтерференції спряжених квазігвинтових поверхонь // Сучасні проблеми моделювання. Мелітополь : Мелітопольський держ. пед. ун-т, 2016. Вип. 5. С. 98–103. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1488> (дата звернення: 01.10.2024).
3. Подкорытов А. Н. Исключение интерференции сопряженных поверхностей зубчатых передач // International Congres – Gear Transmissional. Sofia, Bulgaria, 1995. С. 143–145.
4. АС 1272041. Зубчатая передача с перекрещивающими осями : авторское свидетельство / А. Н. Подкорытов, А. Ф. Жадан. Оpubл. 1986, Бюл. № 10. 3 с.
5. Подкоритов А. М. Ітераційний метод та алгоритм виключення інтерференції складних спряжених поверхонь за наперед заданими умовами // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Міжвідомча наук.-техніч. збірка. Київ : КНУБА, 2000. Вип. 64. С. 109–113.
6. Ismailova N., Bogach V., Lebedev B. Development of a Technique for the Geometrical Modeling of Conjugated Surfaces when Determining the Geometrical Parameters of an Engagement Surface Contact in Kinematic Pairs // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkiv : Technology Center, 2020. № 1/4 (106). P. 17–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209108>
7. Development of the Method for the Formation of One-Dimensional Contours by the Assigned Interpolation Accuracy / Y. Havrylenko, Y. Kholodniak, O. Vershkov, A. Naidysh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Iss. 4 (91). P. 76–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123921>
8. Ismailova N. P., Mohylyanets T. M., Oliynyk N. V. Graphoanalytical Profiling of Conjugate Curvilinear Surfaces of a Cutting Tool // Collection of Scientific Works of the Military Academy (Odesa). 2023. № 1 (19). P. 23–28. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.23-28>

9. Ісмаїлова Н. П., Мікрюков І. С., Бикова Л. Г. Технічне рішення для проектування спряжених зубчастих зачеплень щодо визначення інтерференції в озброєнні та військовій техніці // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (І). С. 82–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.07>

Стаття надійшла до редакції 27.02.2025.

REFERENCES

1. Podkorytov, A. (2002). Theoretical Bases of Conjugate Quazihelical Surfaces, Excluding Interference. In *10th Intern. Conf. on Engineering Design Graphios and Descriptive Geometry, Vol. 1.* (pp. 43–47). Texas, USA, Austin.
2. Podkorytov, A. M., & Ismailova, N. P. (2016). Zahalnyi iteratsiinii metod vykliuchennia interferentsii spriazhenykh kvazihvyntovykh poverkhon [General Iterative Method for Eliminating Interference of Conjugate Quasi-Helical Surfaces]. *Suchasni problemy modeliuвання [Modern Problems of Modeling]*, 5, 98–103. Melitopol. Retrieved from <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/1488> [in Ukrainian].
3. Podkorytov, A. M. (1995). Isklyuchenie interferencii sopryazhennykh poverhnostej zubchatykh peredach [Elimination of interference of mating surfaces of gear transmissions]. In *International Congres – Gear Transmissional.* Sofia–BULGARIA. (pp. 143–145).
4. Podkorytov, A. N., Zhadan, A. F. (1986). *Zubchataya peredacha s perekreshivayushimi osyami : avtorskoe svidetelstvo [Toothed gear with intersecting axes: Author's certificate AC 1272041]* [in Russian].
5. Podkorytov, A. M. (2000). Iteratsiinyi metod ta alhorytm vykliuchennia interferentsii skladnykh spriazhenykh poverkhon za napered zadanyu umovamy [Iterative Method and Algorithm for Eliminating Interference of Complex Conjugate Surfaces under Predetermined Conditions]. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika. Mizhvidomcha nauk.-tekhnich. zbirka [Applied Geometry and Engineering Graphics. Interdepartmental Scientific and Technical Collection]*, 64, 109–113. Kyiv [in Ukrainian].
6. Ismailova, N., Bogach, V., & Lebedev, B. (2020). Development of a Technique for the Geometrical Modeling of Conjugated Surfaces when Determining the Geometrical Parameters of an Engagement Surface Contact in Kinematic Pairs. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/4 (106), 17–22. Kharkiv. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209108>
7. Havrylenko, Y., Kholodniak, Y., Vershkov, O., & Naidysh, A. (2018). Development of the Method for the Formation of One-Dimensional Contours by the Assigned Interpolation Accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, Iss. 4 (91), 76–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123921>
8. Ismailova, N. P., Mohylyanets, T. M., & Oliynyk, N. V. (2023). Graphoanalytical Profiling of Conjugate Curvilinear Surfaces of a Cutting Tool. *Collection of Scientific Works of the Military Academy (Odesa)*, 1 (19), 23–28. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.19.23-28>
9. Ismailova, N. P., Mikryukov, I. S., & Bykova, L. G. (2024). Tekhnichne rishennia dlia proiektuvannia spriazhenykh zubchastykh zacheplen shchodo vyznachennia interferentsii

v ozbroienni ta viiskovii tekhnitsi [A Technical Solution in Designing Coupled Gear Engagements Regarding the Determination of Interference in Weapons and Military Techniques]. *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 (1), 82–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.07> Zhytomyr [in Ukrainian].

T. M. Mohylyanets', H. V. Trushkov

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MODELING THE PROFILE OF A MULTI-SLOT WORM CUTTER FOR MACHINING HELICAL GEAR GEARS IN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

With the advent of the latest technologies for manufacturing military equipment and weapons, along with the progress of modern computing technology, designers are faced with the need to develop new, more effective methods for modeling conjugate curved surfaces of kinematic pairs of gearing without interference. The article considers the issues of creating a method for modeling the profile of a multi-cut worm cutter for machining helical gears in weapons and military equipment. This modeling method is aimed at improving the processing of toothed conjugate curvilinear gears used in gun lifting mechanisms, tank turret turning mechanisms, and self-propelled artillery installations.

The reliability and durability of modern mechanical engineering products, which include a large number of elements with complex conjugate curved surfaces of gearing, are largely determined by the accuracy of their manufacture. In the practice of modeling kinematic pairs of conjugate curved surfaces, certain difficulties often arise that are closely related to the creation of gear products for military equipment and weapons. That is why it is relevant to develop an effective method for modeling the profile of a multi-prong worm cutter for machining conjugate curved tooth surfaces, which allows avoiding interference even at the design stage of the product of components and assemblies of weapons and military equipment. The proposed method will help improve the modeling process, as well as increase the accuracy of gear machining and the overall productivity of production processes with the proposed milling cutter.

Keywords: *gearing; technical solutions; technological process of profile modeling; conjugate surfaces; parameterization; development process; Archimedes spirals; kinematic pairs; interference; weapons and military equipment.*

І. В. Гуменюк, Д. А. Рибчинський

ФОРМАЛІЗОВАНА ПОСТАНОВКА НАУКОВОГО ЗАВДАННЯ З ОПТИМІЗАЦІЇ ПОЛЬОТУ ТА УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПОВІТРЯНИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ

У статті обґрунтовано та доведено необхідність розроблення математичного забезпечення наявних і перспективних зразків озброєння та військової техніки, а саме безпілотних авіаційних комплексів I класу з оптимізації польоту та управління під час використання ретрансляторів на основі безпілотних літальних апаратів, які використовують для вирішення завдань інформаційно-розвідувального забезпечення військ (сил) Збройних Сил України. Встановлено, що застосування таких комплексів забезпечує інформаційну та вогневу перевагу над противником під час проведення повітряної розвідки, ураження його сил та засобів тощо. Виходячи із цих передумов, у публікації здійснено формалізовану постановку важливого наукового завдання, яке полягає в підвищенні ефективності безпілотних авіаційних комплексів I класу за рахунок оптимізації маршруту польоту, топології мережі та енергоефективного управління з використанням ретрансляторів на основі безпілотних літальних апаратів. Автори для визначення ефективності безпілотних авіаційних комплексів запропонували комплексний показник багатокритерійної оптимізації нелінійної схеми компромісів, який залежить від значень імовірності ураження комплексу, його бойового радіуса та живучості. Подано структурно-логічну схему проведення дослідження, яка містить розв'язання таких частинних завдань: аналіз застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів I класу, ретрансляторів на базі безпілотних літальних апаратів та методів їх маршрутизації, а також способів планування оптимальних маршрутів їх польоту на основі алгоритмів розв'язання транспортної задачі; оптимізація маршруту польоту безпілотних авіаційних комплексів I класу для обходу зон їх ураження; енергоефективне застосування тактичних безпілотних авіаційних комплексів на основі ретрансляторів. Кінцевим науковим результатом є розроблене математичне забезпечення безпілотних авіаційних комплексів I класу та перевірка його працездатності. Наведена структурно-логічна схема дозволяє систематизувати сутність та зміст проведення наукового дослідження.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс; повітряний ретранслятор; ефективність; оптимізація; багатокритерійне оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогоднішній день невід'ємною складовою сучасних збройних конфліктів є активне використання безпілотної авіації. Як свідчить досвід ведення бойових дій під час героїчної відсічі збройної агресії російської федерації (рф), на сьогодні спостерігається стійка тенденція щодо зростання значущості застосування безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) [1], зокрема для ведення повітряної

розвідки, ураження сил та засобів противника, коригування вогню артилерії, визначення результатів виконання вогневих завдань тощо.

У разі оцінювання бойової ефективності БпАК, їх формувань або угруповань необхідно враховувати специфічні особливості складу, способів застосування цих комплексів, льотно-технічних характеристик і експлуатаційних обмежень безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [2]. Водночас стрімкий технологічний розвиток разом із удосконаленням тактики застосування такого класу озброєння обумовлює взаємну та швидку модернізацію засобів протидії їм. За цих умов противник удосконалює наявні та розробляє нові контрзасоби протидії. Саме тому завдання щодо підвищення ефективності БпАК є своєчасним, важливим та необхідним для досягнення збройної переваги над ворогом. Виходячи з окреслених передумов, сформовано мету статті, яка полягає у формалізації наукового завдання з оптимізації польоту та управління БпАК під час використання повітряних ретрансляторів на основі БпЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні вже розроблено та реалізовано низку сучасних методів оцінювання та забезпечення відповідного рівня ефективності БпАК, зокрема під час реалізації групового застосування. Наприклад, у [2] запропоновано методичний підхід до визначення бойових потенціалів комплексів, їх підрозділів і угруповань, який, на відміну від чинних методик оцінювання ефективності пілотованої авіації, враховує специфічні особливості сучасних БпАК. У [3, 4] автори розробили методи бойового застосування групи БпЛА військового призначення в системі “група БпЛА – засоби протидії противника – ціль застосування – середовище”, а також обґрунтували перспективність комбінування методів сучасної теорії управління та технологій штучного інтелекту для створення системи їх управління. У [5] розглянуто інноваційні підходи, з-поміж яких: генеративний дизайн, алгоритми керування роєм, комп’ютерний зір і методи інформаційно-екстремального навчання, – що сприяють розширенню функціональних можливостей БпЛА. Отримані в [6] результати, які полягають у комплексному підході до питання покращення ефективності повітряної розвідки, можуть бути використані для розроблення новітніх розвідувальних БпЛА та удосконалення наявних для оцінювання ефективності ведення повітряної розвідки.

Отже, результати аналізу науково-практичних джерел свідчать про те, що для вирішення завдань покращення бойового застосування БпАК, зокрема з використанням ретрансляторів, розроблено достатню кількість науково-методичного та практичного забезпечення. Проте підвищенню ефективності БпАК за рахунок оптимізації маршруту польоту, топології мережі та енергоефективного управління в науковій літературі не присвячено належної уваги.

Формулювання завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно формалізувати наукове завдання, яке полягає в підвищенні ефективності БпАК із потужністю приймально-передавального пристрою комплексу $E_{випр}$, кількістю ретрансляторів на базі БпЛА $N_{ретр}$ та об’єктів розвідки (ОР) $N_{ор}$:

$$E_{БпАК}^* (P_{ураж}, R_{БпАК}, Rel) \rightarrow \max \quad (1)$$

за рахунок зниження ймовірності його ураження $P_{ураж}(t_n)$, збільшення бойового радіуса $R_{БпАК}(N_{ретр})$ та підвищення живучості $Rel(E_{випр}, t_n)$ із часом польотного завдання t_n .

Обмеження та припущення: глибина району ведення розвідки становить 45–50 км, попередньо відомі місця розташування засобів вогневого ураження, радіолокаційні станції радіоелектронного подавлення та засоби контрбатареїної боротьби противника. Кількість ретрансляторів – до 5-6 БпЛА. ОР отримані за допомогою проведення попереднього моніторингу та є вхідними даними для планування маршруту польоту комплексу.

Виклад основного матеріалу. Від початку повномасштабного вторгнення застосування розвідувальних БпАК Силами безпеки й оборони України суттєво покращило ситуаційну обізнаність та підвищило ефективність застосування їх підрозділів.

На сьогодні спостерігається тенденція, коли кількість виявлених та підтверджених цілей переважає спроможність їх уражати. Окрім цього, під час оцінювання ефективності вогневого ураження з'являється оперативна можливість доураження цілі або переведення вогню на іншу ціль [7]. Однак противник усе ж таки має високий рівень успішності протидії розвідувальним та ударним БпАК. Це зумовлено насамперед недосконалістю (відсутністю) засобів автоматизації формування маршрутів польоту та забезпечення надійності зв'язку під час виконання польотних завдань. Ефективність зразків комплексів, які знаходяться на озброєнні та застосовуються підрозділами (військами), істотно знижується, оскільки їх математичне забезпечення не відповідає сучасним вимогам.

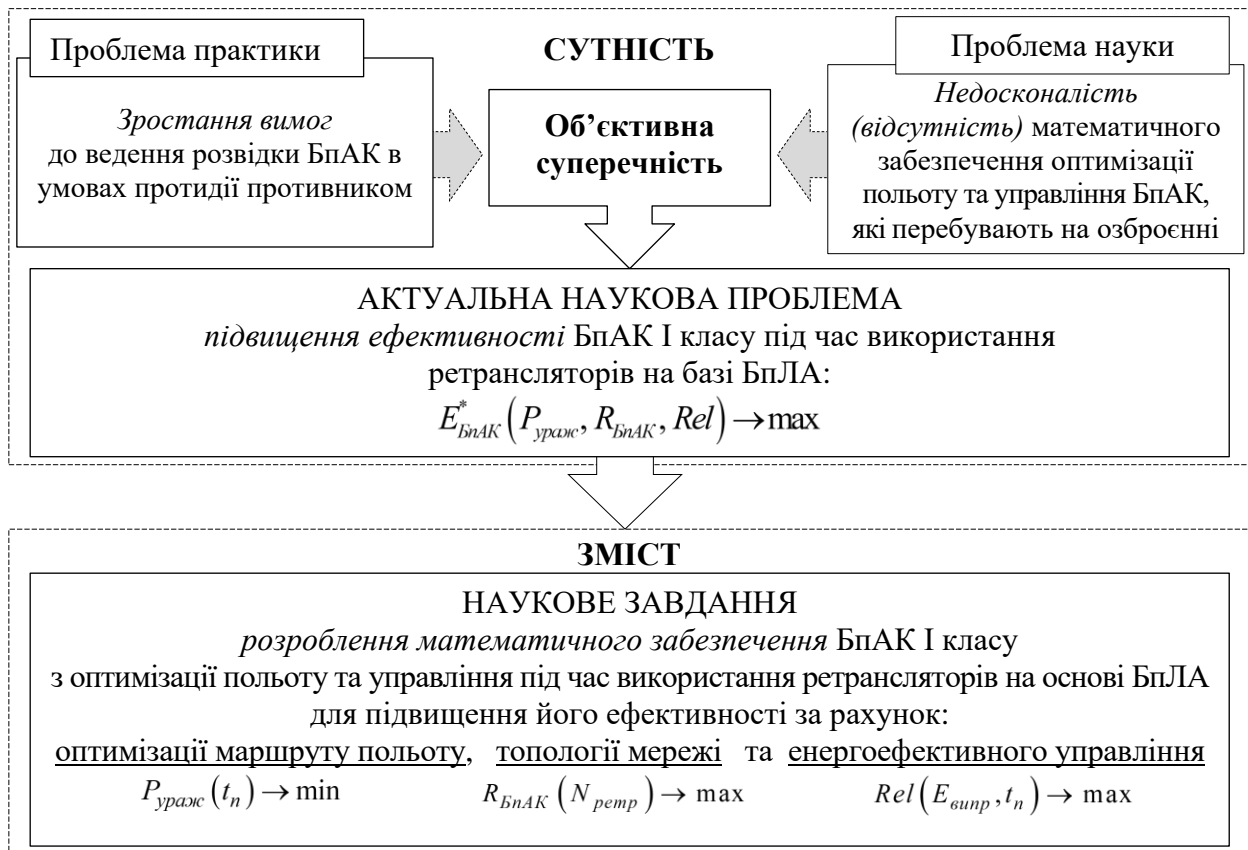


Рис. 1. Сутність і зміст наукового завдання

Крім того, функціональні та бойові можливості БпАК обмежені льотно-технічними та енергетичними характеристиками. Отже, на сьогодні є об'єктивна суперечність між недосконалістю (відсутністю) математичного забезпечення наявних зразків та вимогами з ведення розвідки на сучасному етапі (див. рис. 1).

Враховуючи класичне визначення ефективності як співвідношення результату або ефекту виконання завдання зразком озброєння (комплексом) до витрат, у статті під ефективністю БпАК будемо розуміти комплексний показник (1) багатокритерійної оптимізації нелінійної схеми компромісів [8]:

$$E_{\text{БпАК}}^* = \arg \max \begin{cases} P_{\text{ураж}}(t_n) & \rightarrow \min; \\ R_{\text{БпАК}}(N_{\text{ретр}}) & \rightarrow \max; \\ \text{Rel}(E_{\text{випр}}, t_n) & \rightarrow \max, \end{cases} \quad (1)$$

значення якого залежить від імовірності його ураження, бойового радіуса та живучості.

Отже, $E_{\text{БпАК}}^* \in [0;1]$ розглядаємо як інтегральний параметр, який відображає оптимальний баланс між затратами ресурсів $\{E_{\text{випр}}, N_{\text{ретр}}, t_n\}$ та досягнутими операційними результатами $\{P_{\text{ураж}}, R_{\text{БпАК}}, \text{Rel}\}$. У разі багатокритерійного оцінювання альтернатив виникає необхідність отримання не тільки аналітичної (кількісної), а й якісної оцінки. Із цією метою для отриманого значення ефективності БпАК необхідно провести його нормування та визначити відповідність нормованій фундаментальній шкалі. Інтервальну нормовану шкалу показника $E_{\text{БпАК}}^*$ наведено в табл. 1, у якій показано залежність його якісних властивостей і відповідних кількісних оцінок (значень).

Таблиця 1

Інтервальна нормована шкала ефективності БпАК

Категорія якості	Інтервали нормованої фундаментальної шкали	Ступінь оптимальності (неоптимальне / оптимальне)
Незадовільна	0,0–0,2	Неоптимальне
Низька	0,2–0,4	
Задовільна	0,4–0,5	На межі невизначеності
Добра	0,5–0,7	
Висока	0,7–1,0	Оптимальне

Для вирішення наукового завдання (див. рис. 1) побудовано структурно-логічну схему проведення дослідження (рис. 2), яка дозволяє систематизувати зміст проведення кожного етапу та розв'язання частинних завдань.

Коротко розглянемо всі етапи. Для розв'язання першого частинного завдання необхідно проаналізувати: застосування БпАК І класу в ході бойових дій; протидію застосуванню комплексу противником; способи планування оптимальних маршрутів польоту БпЛА на основі алгоритмів розв'язання транспортної задачі; застосування повітряних ретрансляторів і методів їх маршрутизації.

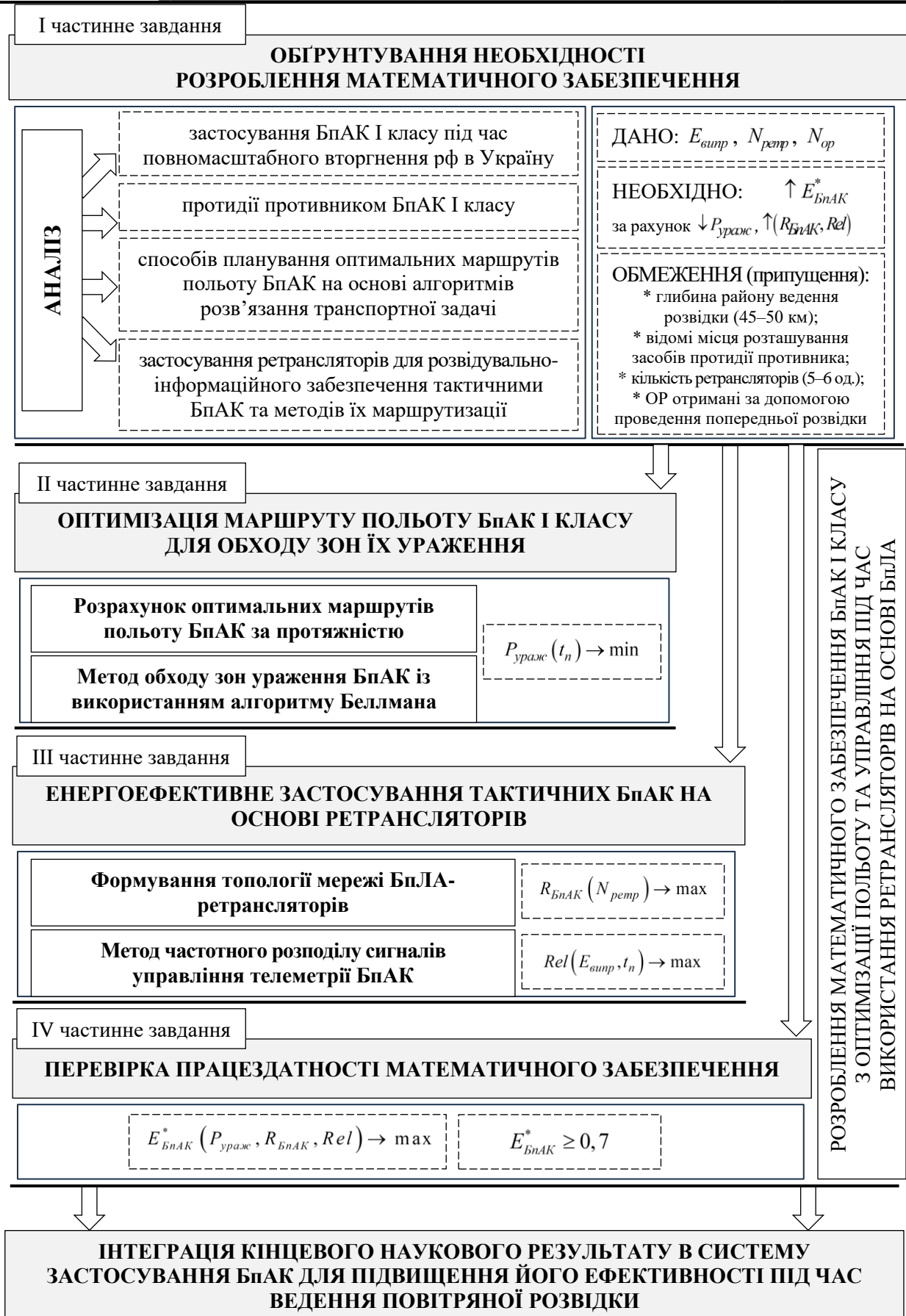


Рис. 2. Структурно-логічна схема проведення дослідження

Результатом цього етапу є обґрунтування та доведення необхідності розроблення відповідного математичного забезпечення, а також постановка завдання наукового дослідження.

Друге частинне завдання – розроблення методу оптимізації маршруту польоту БпАК, що забезпечуватиме зниження ймовірності його ураження. Деталізуємо порядок його розв’язання.

Вхідними даними є ОР (рис. 3а), одержані під час проведення попереднього моніторингу. Для пошуку оптимального маршруту застосовувався генетичний алгоритм з урахуванням його переваг, отриманих у результаті аналізу (рис. 3б).

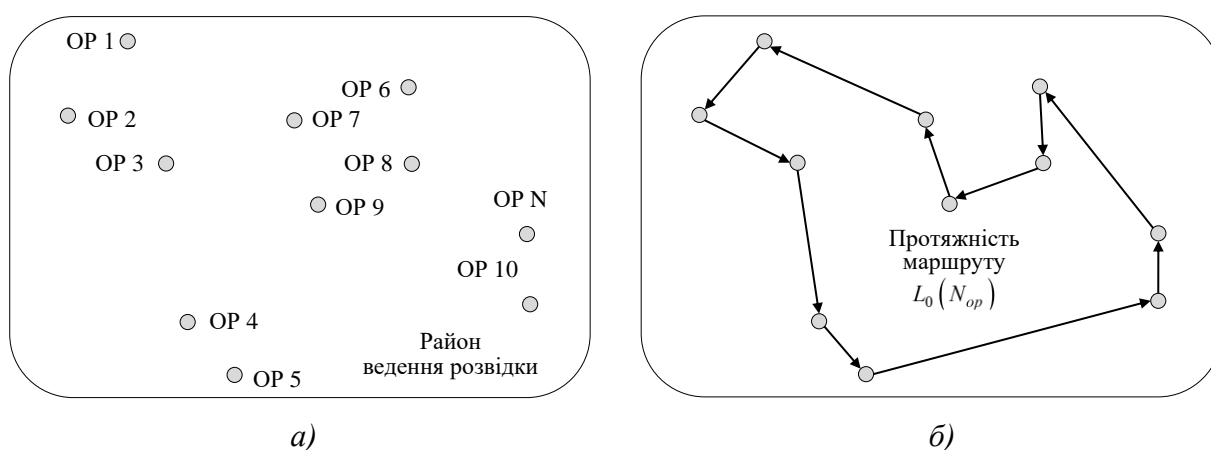


Рис. 3. Пошук маршруту за допомогою генетичного алгоритму: а) вхідні дані; б) результат

Із метою оптимізації маршруту для ОР виконується їх кластеризація за метрикою зони охоплення БпЛА (рис. 4а) з урахуванням висоти його польоту та кута огляду (рис. 4б).

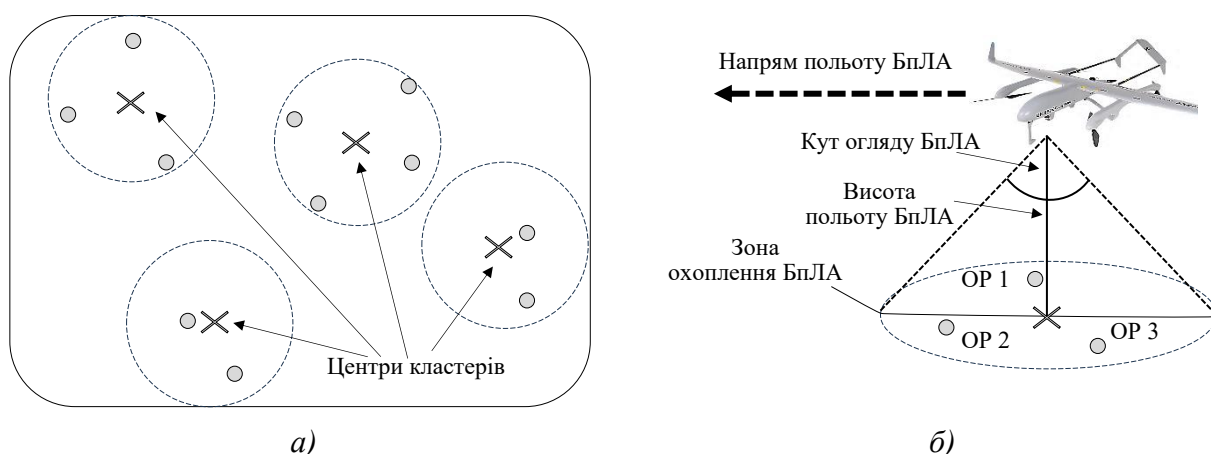


Рис. 4. Кластеризація ОР: а) результат; б) пояснення сутності

Потім пошук маршруту здійснюється за центрами отриманих кластерів (рис. 5а).

Виходячи із визначених для виконання завдання обмежень та припущень, а саме наявності інформації щодо місць розташування засобів протидії противника БпАК,

а також їх тактико-технічних характеристик, визначаємо небезпечні зони для виконання польотного завдання [9]. За таких умов прокладається новий маршрут польоту шляхом їх обходу. Найефективнішим рішенням у цьому разі є пошук оптимального маршруту за допомогою алгоритму Беллмана (рис. 5б).

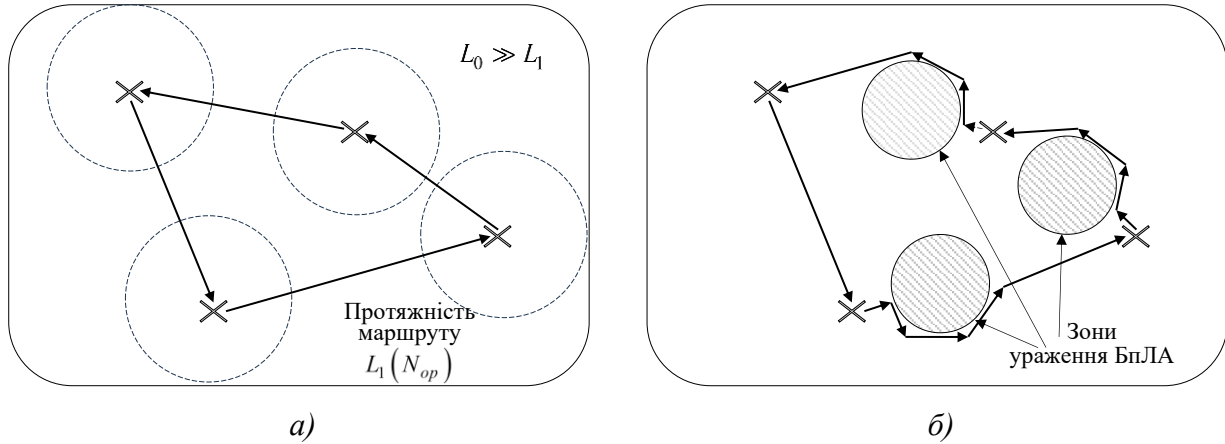


Рис. 5. Пошук маршруту: а) із використанням генетичного алгоритму за центрами кластерів; б) за алгоритмом Беллмана для обходу зон ураження

Досягнутий результат розв'язання частинного завдання шляхом розрахунку оптимальних маршрутів польоту БпАК із використанням генетичного алгоритму за центрами кластерів, а також завдяки обходу зон ураження дозволить суттєво зменшити протяжність маршруту (час польоту) та, відповідно, знизити ймовірність ураження комплексу.

Наступним частинним завданням є енергоефективне застосування тактичних БпАК, яке включає в себе формування топології мережі БпЛА-ретрансляторів (рис. 6) та розроблення методу частотного розподілу сигналів управління телеметрії комплексу (рис. 7).

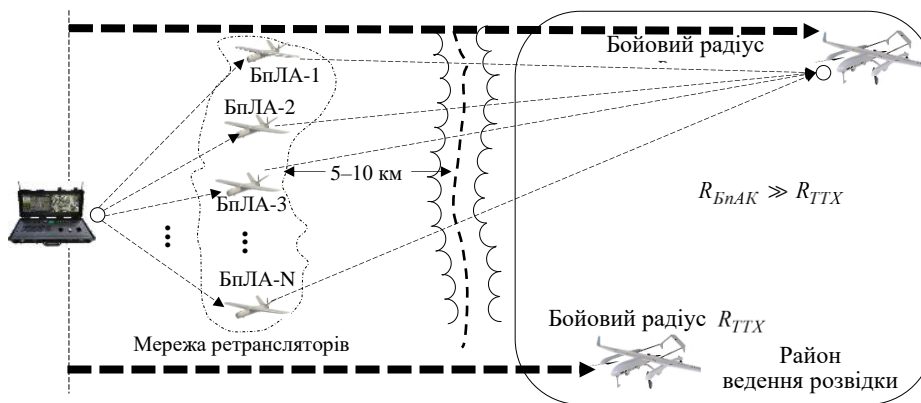


Рис. 6. Формування топології мережі БпЛА-ретрансляторів

Формування топології мережі ретрансляторів на основі БпЛА здійснюється для забезпечення стійкого та ефективного зв'язку в умовах складного рельєфу місцевості, великих відстаней і активної радіоелектронної протидії противником. Використання

такого підходу дозволить значно збільшити значення бойового радіуса $R_{\text{БпАК}}$ порівняно з тактико-технічними характеристиками комплексу.

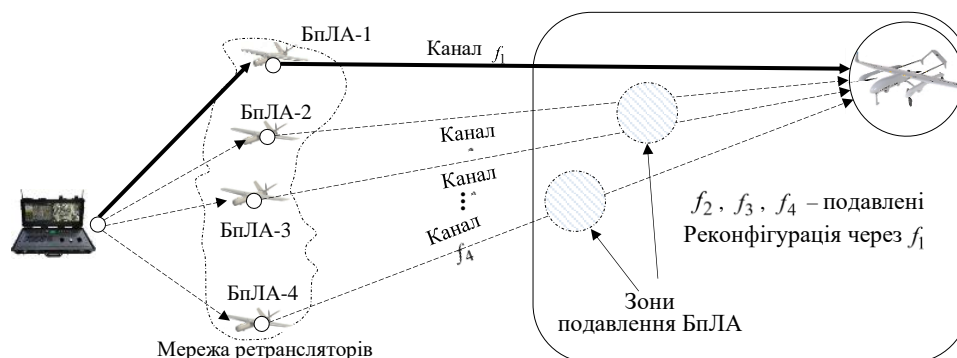


Рис. 7. Варіант частотного розподілу сигналів управління БпЛА

На рис. 7 наведено варіант частотного розподілу сигналів управління БпЛА. За умови успішного подавлення частот управління БпЛА (f_2, f_3, \dots, f_4) противником, виконується реконфігурація мережі зв'язку “БпЛА – ретранслятор – наземна станція управління” з використанням відомих алгоритмів та протоколів маршрутизації. У цьому разі найближчим за відстанню до розвідувального БпАК та енергетичнодоступним ретранслятором є БпЛА-1 з каналом зв'язку на частоті f_1 . Запропонований підхід дозволить мінімізувати потужність сигналів, зменшити енергоспоживання БпЛА-ретранслятора та розвідувального БпАК, що, у свою чергу, забезпечить підвищення живучості комплексу.

Отже, наведена в статті схема демонструє ефективний підхід до вирішення важливого наукового завдання, яке полягає в розробленні математичного забезпечення БпАК I класу з оптимізації польоту та управління під час використання ретрансляторів на основі БпЛА для підвищення його ефективності.

Висновки. У статті наведено формалізовану постановку наукового завдання з оптимізації польоту та управління БпАК під час використання ретрансляторів на основі БпЛА, яке є сучасним, необхідним, важливим та практичним. Для підвищення ефективності БпАК I класу запропоновано математичне забезпечення, структурно-логічна схема якого містить розв'язання таких частинних задач: оптимізація маршруту польоту комплексу для обходу зон його ураження, енергоефективне застосування БпАК на основі ретрансляторів БпЛА. Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення відповідного математичного забезпечення для реалізації поставленого в цій публікації наукового завдання та досягнення відповідної мети.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Правила виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України : наказ Міністерства оборони України від 08.12.2016 № 661. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> (дата звернення: 10.03.2025).

2. Шалигін А. А., Нерубацький В. О., Смик С. І. Методичний підхід до оцінки бойових потенціалів безпілотних авіаційних комплексів, їх підрозділів і угруповань // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2 (43). С. 73–79. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.10>
3. Kharchenko O. V., Artushin L. M., Kononov O. A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles // 36. наук. праць ДНДІА. 2022. Вип. 18 (25). С. 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2022-18-1>
4. Артюшин Л. М., Кононов О. А., Невзгляденко Ю. О. Аналіз перспектив реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів військового призначення // 36. наук. праць ДНДІА. 2023. Вип. 19 (26). С. 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-5>
5. Вадіс Д., Аврутов В. Методи підвищення функціональної ефективності БПЛА // Механіка гіроскопічних систем. 2024. № 48. С. 55–68. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891>
6. Застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах розвідувального забезпечення / В. М. Феденько та ін. // Актуальні питання випробувань та сертифікації озброєння та військової техніки. 2024. № 2 (4). С. 56–62. <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.07>
7. Волошин І. І., Луцевят О. І., Васильченко Д. О. Ефективність застосування безпілотних авіаційних комплексів у сучасних військових конфліктах // Повітряна міць України. 2024. № 1 (6). С. 93–98. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-93-98>
8. Multicriteria Optimization of Dynamic Control Systems / A. M. Voronin, Yu. K. Ziatdinov, O. Y. Permiakov, I. D. Varlamov // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2014. № 2 (20). С. 38–48. [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2\(20\)-38-48](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2(20)-38-48)
9. Humeniuk I., Vorotnikov V., Pozdniakov P. Models of Conflicts in Motion Control Small UAV // The Advanced Science Journal. 2016. Iss. 3. P. 63–72. <https://doi.org/10.15550/ASJ.2016.03.063>

Стаття надійшла до редакції 31.03.2025.

REFERENCES

1. *Pravyla vykonannia polotiv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksamy derzhavnoi aviatsii Ukrainy : nakaz Ministerstva oborony Ukrainy vid 08.12.2016 № 661 [Rules for Performing Flights with Unmanned Aerial Systems of the State Aviation of Ukraine : order of the Ministry of Defense of Ukraine from December 8, 2016, № 661].* Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text> [in Ukrainian].
2. Shalyhin, A. A., Nerubatskyi, V. O., & Smyk, S. I. (2021). *Metodychnyi pidkhid do otsinky boiovykh potentsialiv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv, yikh pidrozdiliv i uhrupovan [Methodical approach to assessing the combat potential of unmanned aerial systems, their units and groups].* *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine]*, 2 (43), 73–79. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.10> [in Ukrainian].

3. Kharchenko, O. V., Artushin, L. M., & Kononov, O. A. (2022). Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Collection of Scientific Works of SRIA*, 18 (25), 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2022-18-1>
4. Artiushyn, L. M., Kononov, O. A., & Nevzgliadenko, Yu. O. (2023). Analiz perspektyv realizatsii hrupovoho zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ viiskovoho pryznachennia [Analysis of Prospects for the Implementation of Group Use of Military Unmanned Aerial Vehicles]. *Zb. nauk. prats DNDIA [Collection of scientific papers of SRIA]*, 19 (26), 42–47. <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-5> [in Ukrainian].
5. Vadis, D., & Avrutov, V. (2024). Metody pidvyshchennia funktsionalnoi efektyvnosti BPLA [Methods for increasing the functional efficiency of UAVs]. *Mekhanika hiroskopichnykh system [Mechanics of Gyroscopic Systems]*, 48, 55–68. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891> [in Ukrainian].
6. Fedenko, V. M. et al. (2024). Zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv v interesakh rozviduvalnoho zabezpechennia [Application of Unmanned Aerial Systems in the Interests of Intelligence Support]. *Aktualni pytannia vyprobuvan ta sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Current Issues of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, 2 (4), 56–62. <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.07> [in Ukrainian].
7. Voloshyn, I. I., Lutseviat, O. I., & Vasylchenko, D. O. (2024). Efektyvnist zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u suchasnykh viiskovykh konfliktakh [Unmanned Aerial System's Efficiency of Use in Modern Military Conflicts]. *Povitriana mits Ukrainy [Air Power of Ukraine]*, 1 (6), 93–98. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-93-98> [in Ukrainian].
8. Voronin, A. M., Ziatdinov, Yu. K., Permiakov, O. Y., & Varlamov, I. D. (2014). Multicriteria Optimization of Dynamic Control Systems. *Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony [Modern Information Technologies in the Field of Security and Defense]*, 2 (20), 38–48. [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2\(20\)-38-48](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-2(20)-38-48)
9. Humeniuk, I., Vorotnikov, V., & Pozdniakov, P. (2016). Models of Conflicts in Motion Control Small UAV. *The Advanced Science Journal*, 3, 63–72. <https://doi.org/10.15550/ASJ.2016.03.063>

I. V. Humeniuk, D. A. Rybchynskyi

STATEMENT OF THE SCIENTIFIC TASK FOR OPTIMIZING FLIGHT AND CONTROL OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS USING AIRBORNE REPEATERS

The article substantiates and proves the necessity of developing mathematical support for existing and prospective models of weapons and military equipment, namely, class I unmanned aerial systems, for flight optimization and control using unmanned aerial vehicle-based repeaters, which are used to solve the tasks of information and reconnaissance support of troops (forces) of the Armed Forces of Ukraine. It is established that the use of such systems provides information and fire superiority over the enemy during aerial reconnaissance, engagement of their forces and assets, etc. Based on these prerequisites, the paper presents a formalized statement of an important scientific problem, which consists in increasing the efficiency of class I unmanned aerial systems by optimizing the flight route, network topology, as well as energy-

efficient control using unmanned aerial vehicle-based repeaters. The authors define "Unmanned aerial systems efficiency" as a comprehensive indicator of multi-criteria optimization of a non-linear compromise scheme, which depends on the values of the complex's probability of being hit, its combat radius, and survivability. A structural and logical scheme of the research is presented, which includes the solution of the following subtasks: analysis of the use of tactical class I unmanned aerial systems, unmanned aerial vehicle-based repeaters, and their routing methods, as well as methods of planning optimal flight routes based on transport problem solving algorithms; optimization of the flight route of class I unmanned aerial systems to bypass their engagement zones; energy-efficient use of tactical unmanned aerial systems based on repeaters. The final scientific result is the developed mathematical support for class I unmanned aerial systems and the verification of its performance. The presented structural and logical scheme allows to systematize the essence and content of the scientific research.

Keywords: *unmanned aerial system; airborne repeater; efficiency; optimization; multi-criteria evaluation.*

І. В. Зімчук, Т. М. Шапар

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В інерціальних навігаційних системах безпілотних літальних апаратів для підвищення точності навігаційних вимірів застосовують алгоритми фільтрації, зокрема фільтр Калмана та різні його модифікації. Практичне застосування таких алгоритмів ускладнюється їх обчислювальною складністю й абстрактною формою подання, яка не відображає усіх особливостей. Саме тому актуальним є завдання синтезу алгоритмів фільтрації, які будуть відповідати вимогам гарантованої збіжності та мінімальної обчислювальної складності щодо своєї реалізації. Остання вимога є надзвичайно важливою для навігаційних систем малих безпілотних літальних апаратів, оскільки їх бортове обладнання має бути дешевим і малоенергоємним. У зв'язку із цим у статті викладено параметричний синтез оптимального алгоритму поліноміальної фільтрації результатів вимірювань акселерометричних датчиків орієнтації в інерціальних навігаційних системах безпілотних літальних апаратів. Під параметричним синтезом у цій публікації розуміється визначення оптимальних внутрішніх параметрів, якими є коефіцієнти згладжування фільтра. Синтез параметрів виконано за умови заданої структури фільтра, який синтезовано за методикою, запропонованою авторами в попередніх дослідженнях, що ґрунтується на теорії інваріантності. Оптимальні коефіцієнти згладжування визначено шляхом умовної оптимізації цільової функції, за яку обрано мінімум середнього квадрата помилки оцінювання. Як обмеження прийнято умови стійкості фільтра, які визначено за алгебричним критерієм. Завдяки скалярній формі реалізації синтезованому оптимальному алгоритму фільтрації притаманна низька обчислювальна складність. Його ефективність підтверджено комп'ютерним моделюванням за результатами реальних вимірів акселерометра ADXL345, що входить до складу Arduino UNO R3.

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

Постановка проблеми в загальному вигляді. Розширення сфер застосування та масовість використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) зумовлюють їх постійне технічне вдосконалення. Однією з ключових вимог до БПЛА є забезпечення його високоточної, надійної навігації та орієнтації [1].

Задача визначення кутової орієнтації БПЛА та координат його місцеперебування розв'язується пілотажно-навігаційним комплексом, до складу якого входять інерціальна та супутникова навігаційні системи (ІНС та СНС) [2, 3]. Основою сучасних навігаційних комплексів є ІНС. Це обумовлено їх повною автономністю та можливістю надавати повну інформацію про навігаційні параметри руху: кути курсу, тангажа, крену, прискорення,

© І. В. Зімчук, Т. М. Шапар, 2025

а також швидкість руху та координати місця БпЛА. Завдяки можливості визначати кутове положення об'єкта з високою точністю в будь-якому діапазоні кутів та з високою частотою видачі інформації, ІНС не мають альтернативи, особливо за відсутності власної супутникової мережі [4].

У БпЛА малої маси широкого застосування набули безплатформні ІНС (БІНС), реалізовані на базі акселерометрів та гіроскопів, виконаних за технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС), основними перевагами яких є малі габарити й вага, висока завадозахищеність, надійність та автономність. Принцип роботи БІНС ґрунтується на обчисленні лінійного та кутового положення БпЛА шляхом інтегрування перетворених у потрібну систему координат лінійних і кутових прискорень, які вимірюються встановленими на борту акселерометрами й гіроскопами. Функції гіростабілізованої платформи виконує бортовий обчислювач [5].

Склад вимірювачів повинен бути достатнім для отримання інформації про вектори уявного прискорення та абсолютної кутової швидкості, він може бути таким: вимірювачі кутової швидкості та акселерометри, лише акселерометри, акселерометри та некеровані гіроскопи [5]. Однак у складі вимірів акселерометра наявний адитивний шум, спричинений особливостями конструкції та умовами функціонування, яким властиві стохастичні чинники, пов'язані із середовищем експлуатації: небажані механічні вібрації, електромагнітні перешкоди від інших електромеханічних або механічних елементів тощо. Для боротьби з шумами використовують різні алгоритми фільтрації, які реалізуються у вигляді обчислювальних процедур пілотажно-навігаційного комплексу [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичним способом усунення шуму та похибок акселерометричних датчиків 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, та 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.

Разом із цим для низки задач застосування лінійних алгоритмів неприпустимо внаслідок нелінійного характеру рівнянь, які описують динаміку вектора стану та вимірювань. Саме тому є декілька модифікацій класичного фільтра Калмана, які дозволяють застосовувати його для нелінійних систем, а саме: 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 якими полягає в методах лінеаризації нелінійних моделей.

Розглянуті алгоритми фільтрації належать до алгоритмів калманівського типу, вони 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 виправдано. Крім того, інженери часто стикаються з проблемою 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 [16, 17], 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 задачу мінімізації помилок оцінювання в цьому фільтрі розв'язують із 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 [17]. 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, у яких розв'язуються прикладні задачі фільтрації. Зокрема, активно розвиваються методи поліноміальної фільтрації [18], у яких враховується той факт, що нелінійностям у рівняннях динаміки та вимірювань притаманний поліноміальний характер, а вимірювання навігаційних параметрів є одновимірним потоком даних.

Досить часто завдання оцінювання спрощують шляхом обмеження класу алгоритмів, що передбачає їх вибір, наприклад, у класі лінійних алгоритмів [13]. Для таких припущень у [15] викладено метод, який дозволяє синтезувати ефективні згладжувальні фільтри в разі скалярних моделей вхідних дій і дає можливість формувати алгоритми заданої структури, виходячи із забезпечення необхідної точності оцінювання в сталому режимі. Однак метод викладено лише на рівні структурного синтезу. Порядок визначення оптимальних значень коефіцієнтів згладжування не розглянуто.

Незважаючи на те, що на теперішній час запропоновано досить велику кількість різноманітних алгоритмів фільтрації, задача їх розроблення залишається актуальною.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є параметричний синтез оптимального алгоритму поліноміальної фільтрації результатів вимірювань акселерометричних датчиків орієнтації в ІНС БпЛА. Під параметричним синтезом розуміємо визначення оптимальних внутрішніх параметрів [19, 20], якими є коефіцієнти згладжування фільтра. Алгоритм фільтрації повинен задовольняти вимоги гарантованої збіжності процесу фільтрації та мінімальної обчислювальної складності щодо своєї реалізації. Остання вимога є надзвичайно актуальною в навігаційних системах малих БпЛА, оскільки їх бортове обладнання має бути дешевим, малоенергоємним та з мінімальними масою й об'ємом [3].

Виклад основного матеріалу

Дано: рівняння стану та спостереження

$$x(n) = x(n-1) + \sum_{m=1}^N \frac{T^m}{m!} \Delta^m x(n-1), \quad (1)$$

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

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 алгоритму фільтрації з відомою структурою необхідно синтезувати алгоритм розрахунку оптимальних значень коефіцієнтів згладжування. Критерій якості:

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

тут

$$\varepsilon(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (3)$$

– помилка оцінювання.

Обмеження: помилки вимірювання є некорельованим білим гаусівським шумом:

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

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

де M – символ математичного сподівання;

R – дисперсія помилок вимірювань, значення якої вважається відомим.

Параметричний синтез алгоритму фільтрації. Для умов поставленої задачі в [15] викладено методику синтезу алгоритмів фільтрації, суть якої полягає в застосуванні таких рівнянь:

$$\begin{aligned} x_e(n) &= [1 - A(z)] \hat{x}(n); \\ \tilde{u}(n) &= g(n) - x_e(n); \\ \hat{x}(n) &= \frac{B(z)}{A(z)} \tilde{u}(n), \end{aligned} \quad (4)$$

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

$\tilde{u}(n)$ – нев'язка;

$A(z) = (1 - z^{-1})^y \left[1 + \sum_{i=1}^k a_i z^{-i} \right]$ – чисельник передавальної функції фільтра за помилкою,

який визначає порядок астатизму та розраховується на підставі третьої форми умов інваріантності

$$A(z)x(n) = 0; \quad (5)$$

$B(z) = \sum_{j=0}^l b_j z^{-j}$ – чисельник передавальної функції фільтра, який містить коефіцієнти

згладжування, значення яких характеризують якість фільтрації.

Для поліномів

$$A(z) = (1 - z^{-1})^2 (1 + a_1 z^{-1}), \quad (6)$$

$$B(b_0) = b_0$$

за виразами (4) синтезовано згладжувальний фільтр [15], який описується різницевиими рівняннями:

$$x_e(n) = (2 - a_1)\hat{x}(n-1) - (1 - 2a_1)\hat{x}(n-2) - a_1\hat{x}(n-3),$$

$$\tilde{u}(n) = g(n) - x_e(n), \quad (7)$$

$$\hat{x}(n) = b_0\tilde{u}(n) + \hat{x}_e(n),$$

де b_0 – коефіцієнт згладжування;

a_1 – коефіцієнт підвищення порядку астатизму фільтра.

Оптимальні значення коефіцієнтів b_0 та a_1 визначаємо шляхом умовної оптимізації цільової функції за такими виразами:

$$\frac{\partial P}{\partial b_0} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial a_1} = 0, \quad (8)$$

у яких $P(n)$ підлягає визначенню.

Обмеженнями на значення є умови стійкості згладжувального фільтра:

$$0 < b_0 \leq 1, \quad -1 < a_1 < 0, \quad b_0 > -a_1 - 0,3.$$

Для отримання виразу цільової функції $P(n)$ рівняння (3) для помилки оцінювання подається в такому вигляді:

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_e(n) - b_0[\varepsilon_e(n) + f(n)], \quad (9)$$

де

$$\varepsilon_e(n) = x(n) - x_e(n) \quad (10)$$

– помилка екстраполяції.

Підстановкою рівняння (9) у (2) з урахуванням умов (1) отримаємо

$$P(n) = P_e(n) - 2b_0 P_e(n) + b_0^2 [P_e(n) + R(n)], \quad (11)$$

де

$$P_e(n) = M[\varepsilon_e^2(n)] \quad (12)$$

– дисперсія помилок екстраполяції.

Із розрахунку похідної (8) визначаємо вираз для оптимального значення коефіцієнта згладжування:

$$b_0(n) = \frac{P_e(n)}{P_e(n) + R(n)}. \quad (13)$$

Підстановкою рівняння (13) у вираз (11) знаходимо співвідношення між дисперсіями помилок оцінювання та екстраполяції:

$$P(n) = (1 - b_0) P_e(n). \quad (14)$$

Для визначення дисперсії помилок екстраполяції, яка входить до складу рівнянь (13) та (14), із (3) отримуємо вираз для оцінювання в такому вигляді:

$$\hat{x}(n) = x(n) - \varepsilon(n). \quad (15)$$

Підставивши (15) у рівняння розрахунку екстрапольованого значення (4), з урахуванням умови (5) виведемо (10) для помилки екстраполяції:

$$\varepsilon_e(n) = [1 - A(z)] \varepsilon(n). \quad (16)$$

Тоді вираз (12) для дисперсії помилок екстраполяції набуває такого вигляду:

$$P_e(n) = [1 - A(z)]^2 P(n). \quad (17)$$

Для узгодження в часі процесів фільтрації та екстраполяції помилка оцінювання подається таким чином:

$$\varepsilon(n) = z\varepsilon(n-1),$$

звідки

$$P(n) = z^2 P(n-1), \quad (18)$$

де z – оператор часового випередження.

З урахуванням (18) загальний вираз (17) для розрахунку дисперсії помилок екстраполяції набуває кінцевого вигляду:

$$P_e(n) = [1 - A(z)]^2 z^2 P(n-1). \quad (19)$$

Підстановкою полінома $A(n)$ у (19) отримаємо рівняння для розрахунку дисперсії помилок екстраполяції:

$$P_e(n) = (2 + a_1)P(n-1) - 2(2 - 3a_1 - 2a_1^2)P(n-2) + (1 - 8a_1 + 2a_1^2)P(n-3) + 2a_1(1 - 2a_1)P(n-4) + a_1^2 P(n-5). \quad (20)$$

Порядок розрахунку значення коефіцієнта a_1 визначається з виразу (8) після підстановки рівняння (20) у співвідношення (14):

$$a_1(n) = - \frac{P(n-1) + 6P(n-2) - 8P(n-3) + 2P(n-4)}{8P(n-2) + 4P(n-3) - 8P(n-4) + 2P(n-5)}. \quad (21)$$

Отже, об'єднавши разом рівняння (7), (13), (14), (20) та (21), повний алгоритм фільтрації вимірювань датчиків орієнтації ІНС за скалярних моделей вхідних дій, у якому виконується критерій якості (2), матиме такий вигляд:

$$a_1(n) = - \frac{P(n-1) + 6P(n-2) - 8P(n-3) + 2P(n-4)}{8P(n-2) + 4P(n-3) - 8P(n-4) + 2P(n-5)},$$

$$x_e(n) = (2 - a_1)\hat{x}(n-1) - (1 - 2a_1)\hat{x}(n-2) - a_1\hat{x}(n-3),$$

$$P_e(n) = (2 + a_1)P(n-1) - 2(2 - 3a_1 - 2a_1^2)P(n-2) + (1 - 8a_1 + 2a_1^2)P(n-3) + 2a_1(1 - 2a_1)P(n-4) + a_1^2 P(n-5),$$

$$b_0(n) = \frac{P_e(n)}{P_e(n) + R(n)}, \quad (22)$$

$$\tilde{u}(n) = g(n) - x_e(n),$$

$$\hat{x}(n) = b_0\tilde{u}(n) + \hat{x}_e(n),$$

$$P(n) = (1 - b_0)P_e(n).$$

Синтезований алгоритм складається з двох етапів: передбачення (екстраполяції) та корекції.

Результати моделювання. Ефективність синтезованого алгоритму оцінювали з використанням комп'ютерного моделювання. Розроблено імітаційну модель, яка дозволяє шляхом виконання послідовності обчислень із подальшим графічним відображенням результатів імітувати процес фільтрації вхідних сигналів у реальному часі. За вхідні дані використовували реальні виміри триосьового акселерометра ADXL345, який було встановлено безпосередньо на борту БпЛА. Імітувалася зміна кута крену БпЛА (рис. 1).

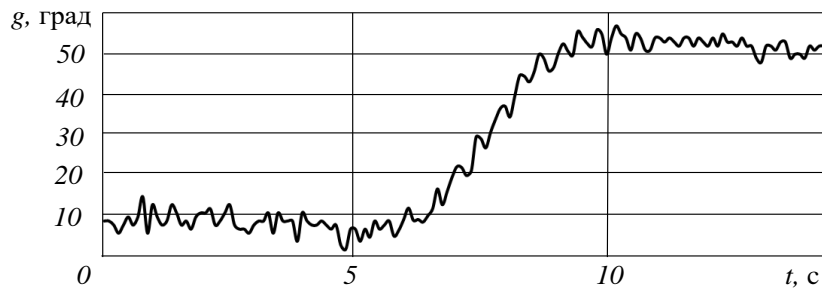


Рис. 1. Зміна кута крену БпЛА, який визначено за результатами вимірювань акселерометра

Моделювання відбувалося за таких умов: $T = 0,1$ с, $P(0) = 5$ град². Результат фільтрації вимірювань із застосуванням синтезованого алгоритму показано на рис. 2.

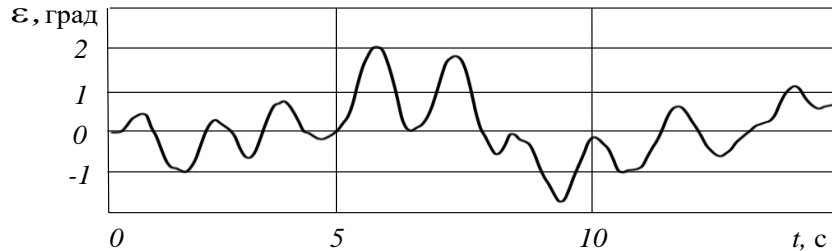


Рис. 2. Результат фільтрації кута крену БпЛА в разі застосування синтезованого алгоритму

Отримані результати порівнювали з результатами роботи фільтра Калмана (рис. 3), налаштованого на модель для $N = 1$.

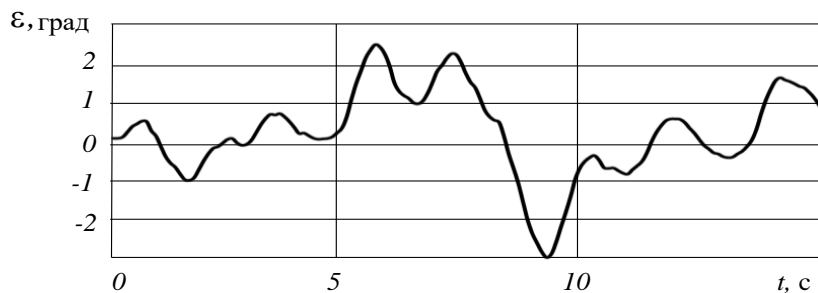


Рис. 3. Результат фільтрації кута крену БпЛА в разі застосування фільтра Калмана

У табл. 1 подано середнє значення критерію якості для досліджуваних фільтрів на інтервалах спостереження.

Таблиця 1

Значення критерію якості на інтервалах спостереження

	Часовий інтервал фільтрації, с		
	0–5	6–10	11–15
Синтезований фільтр	0,516 град ²	0,875 град ²	0,348 град ²
Фільтр Калмана	0,489 град ²	1,419 град ²	0,359 град ²

З отриманих результатів видно, що на інтервалах часу, де кутове положення БпЛА не змінюється, синтезований алгоритм забезпечує якість фільтрації, яка відповідає фільтру Калмана. Однак на інтервалах часу, коли кутове положення корпусу БпЛА змінюється ($t = 6-10$ с), у синтезованому алгоритмі значення середнього квадрата помилки оцінювання в 1,6 раза менше, ніж у фільтра Калмана.

Отже, в умовах динамічної зміни кутового положення БпЛА застосування синтезованого алгоритму дозволило досягти кращої якості фільтрації, ніж застосування фільтра Калмана.

Висновки. У статті викладено параметричний синтез оптимального (за критерієм мінімум середнього квадрата помилки оцінювання) алгоритму фільтрації навігаційних вимірів в ІНС БпЛА. Алгоритм синтезовано за умови апіорно визначеної структури фільтра. Його працездатність та ефективність підтверджено результатами комп'ютерного моделювання.

Основними властивостями синтезованого алгоритму є:

низька обчислювальна складність, обумовлена скалярною формою рівнянь, за якими реалізовано процес фільтрації;

нестационарність, причиною якої є розрахунок оптимального коефіцієнта згладжування на кожному кроці оброблення вимірювань;

рекурентна форма: нові оцінки отримуються шляхом коригування старих на основі нових спостережень.

Практичне застосування синтезованого алгоритму дозволяє:

здійснювати контроль якості фільтрації за значенням обраного показника ефективності;

обмежувати значення динамічної помилки оцінювання в разі невідповідності між математичною моделлю вхідних даних та фільтра.

Для реалізації синтезованого алгоритму необхідна наявність апіорних відомостей про статистичні характеристики помилок вимірювань.

Отже, викладені теоретичні положення є продовженням результатів досліджень, які описано авторами в роботі [15]. За напрямком подальших досліджень слід вважати розробку алгоритмів ідентифікації статистичних характеристик помилок вимірювань для умов їх апіорної невизначеності.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гула В. С., Грига В. М. Аналіз сучасного стану сенсорів для інерціальної навігації безпілотних літальних апаратів // Технології та інжиніринг. 2024. № 4 (21). С. 29–47. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.3>
2. 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>
3. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Туник, С. В. Павлова. Київ : ТОВ «Абрис-принт», 2012. 464 с. ISBN: 978-966-1653-05-3.
4. Грекуляк М. В., Куценко В. В., Луценко А. С. Аналіз методів застосування інерціальних навігаційних систем для підвищення безпеки навігації повітряних засобів // Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». II International Scientific and Theoretical Conference «Current Issues of Science, Prospects and Challenges». (June 10, 2022. Sydney, Australia). P. 69–73. <https://doi.org/10.36074/scientia-10.06.2022>
5. Рудик А. В., Квасніков В. П. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота : Монографія. Харків : Мачулін, 2018. 272 с. ISBN 978-617-7589-12-8.
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. Василюк, А. В. Рудик та ін. Рівне : Овід, 2020. 380 с.
8. Nemat Allah Ghahremani, Hassan Majed Alhassan. Generalized Incremental Predictive Filter for Integrated Navigation System INS/GPS in Tangent Frame // Journal of Control (English Edition). 2022. Vol. 01, No. 01. P. 49–59. <https://doi.org/10.52547/jocee.1.1.49>
9. Цуканов О. Ф., Якорнов Є. А. Методи оцінки параметрів руху маневруючих безпілотних літальних апаратів в інфокомунікаційних сенсорних мережах // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2022. № 2 (04). С. 74–84. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-08>
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 // Conference: 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. <https://doi.org/10.1109/taes.2006.1642588>

14. Particle Kalman Filtering: A Nonlinear Framework for Ensemble Kalman Filters / Ibrahim Hoteit, Xiaodong Luo, Dinh-Tuan Pham, Irene M. Moroz. // 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/RADAR.2024.96.21-27>
16. 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 04.03.2025).
17. 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>
18. 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, No. 2. P. 248–259. <https://doi.org/10.1049/cth2.12036>
19. Романенков Ю. О., Варталян В. М. Постановка задачі ретроспективного аналізу якості двопараметричної прогнозу моделі // Авіація, промисловість, суспільство : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Кременчук, 18 трав. 2023 р.) Харків : ХНУВС, 2023. С. 487–488. ISBN 978-966-610-270-9.
20. Писарчук О. О., Соколов К. О., Гудима О. П. Розроблення багатокритеріальної методики ситуаційного управління структурою і параметрами системи забезпечення інформаційної безпеки // Зб. наук. праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУО України. 2016. № 3. С. 24–32.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2025.

REFERENCES

1. Hula, V. S., & Hryha, V. M. (2024). Analiz suchasnoho stanu sensoriv dlia inertsiialnoi navihatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ [Analysis of the Current State of Sensors for Inertial Navigation of Unmanned Aerial Vehicles]. *Tekhnologii ta inzhynirynh [Technologies and Engineering]*, 4 (21), 29–47. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.3> [in Ukrainian].
2. 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 [Increasing the Accuracy of Autonomous Navigation of Small Unmanned Aerial Vehicles by Taking into Account Wind and Sensor Errors]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Forces of*

the Armed Forces of Ukraine], 3 (48), 44–50. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.48.05> [in Ukrainian].

3. Kharchenko, V. P., Chepizhenko, V. I., Tunik, A. A., & Pavlova, S. V. (2012). *Avionika bezpilotnykh litalnykh aparativ [Avionics of Unmanned Aerial Vehicles]*. Kyiv. ISBN: 978-966-1653-05-3 [in Ukrainian].

4. Hrekuliak, M. V., Kutsenko, V. V., & Lutsenko, A. S. (2022). Analiz metodiv zastosuvannya inertsiialnykh navihatsiinykh system dlia pidvyshchennia bezpeky navihatsii povitrianykh zasobiv [Analysis of Methods for Using Inertial Navigation Systems to Improve the Safety of Air Vehicle Navigation]. In *Collection of Scientific Papers «SCIENTIA». II International Scientific and Theoretical Conference «Current Issues of Science, Prospects and Challenges»*. Sydney, Australia. (pp. 69–73). <https://doi.org/10.36074/scientia-10.06.2022>

5. Rudyk, A. V., & Kvasnikov, V. P. (2018). *Naukovi osnovy ta pryntsyipy pobudovy pryladovoi systemy vymiriuvannya pryskorennia mobilnoho robota: Monohrafiia [Scientific Foundations and Principles of Constructing an Instrument System for Measuring the Acceleration of a Mobile Robot: Monograph]*. Kharkiv. ISBN 978-617-7589-12-8 [in Ukrainian].

6. Shuliak, M. L. (2020). Analiz isnuuiuchykh 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 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 and Automation Systems: Monograph]*. Rivne [in Ukrainian].

8. Nemat Allah Ghahremani, Hassan Majed Alhassan. (2022). Generalized Incremental Predictive Filter for Integrated Navigation System INS/GPS in Tangent Frame. *Journal of Control*, 01, 49–59. <https://doi.org/10.52547/jocee.1.1.49>

9. Tsukanov, O. F., Yakornov, Ye. A. (2022). Metody otsinky parametriv rukhu manevruuiuchykh bezpilotnykh litalnykh aparativ v infokomunikatsiinykh sensorynykh merezhakh [Methods for Estimating the Motion Parameters of Maneuvering Unmanned Aerial Vehicles in Infocommunication Sensor Networks]. *Infokomunikatsiini ta komp'uterni tekhnolohii [Infocommunication and Computer Technologies]*, 2 (04), 74–84. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-08> [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 *Conference: 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. Ibrahim Hoteit, Xiaodong Luo, Dinh-Tuan Pham, & Irene M. Moroz. (2010). Particle Kalman Filtering: A Nonlinear Framework for Ensemble Kalman Filters. In *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 Algorithms for Filtering Measurement Results in Navigation Systems of Unmanned Aerial Vehicles]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya Radiotekhnika, Radioaparatabuduvannia [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. Fesenko, O. D. (2018). Vdoskonalenyi metod oriantatsii 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 Rocket and Space Engineering]*, 29 (68), 35–42. Retrived from http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29_3%281%29_9 [in Ukrainian].
17. Buhaiiov, D. V., Avrutov, V. V., & Nesterenko, O. I. (2020). Eksperymentalne porivniannia alhorytmiv vyznachennia oriantatsii na bazi komplimentarnoho filtra ta filtra Madzhvika [Experimental Comparison of Orientation Determination Algorithms Based on the Complementary Filter and the 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].
18. 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>
19. Romanenkov, Yu. O., & Vartanian, V. M. (2023). Postanovka zadachi retrospektyvnoho analizu yakosti dvoparmetrychnoi prohnoznoi modeli [Setting the Task of Retrospective Analysis of the Quality of a Two-Parameter Predictive Model]. In *Aviatsiia, promyslovisit, suspilstvo : materialy IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. [Aviation, Industry, Society: Materials of the IV International Scientific and Practical Conference]*. Kremenichuk, May 18, 2023. (pp. 487–488). Kharkiv. ISBN 978-966-610-270-9 [in Ukrainian].
20. Pysarchuk, O. O., Sokolov, K. O., & Hudyma, O. P. (2016). Rozroblennia bahatokryterialnoi metodyky sytuatsiinoho upravlinnia strukturoiu i parametramy systemy zabezpechennia informatsiinoi bezpeky [Development of a Multi-Criteria Methodology for Situational Management of the Structure and Parameters of the Information Security System]. *Zb. nauk. prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen NUO Ukrainy [Collection of scientific works of the Center for Military-Strategic Research of the National University of Defense of Ukraine]*, 3, 24–32 [in Ukrainian].

PARAMETRIC SYNTHESIS OF FILTERING ALGORITHMS FOR INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS OF UNMANNED AIRCRAFT

In inertial navigation systems of unmanned aerial vehicles, filtering algorithms, in particular the Kalman filter and its various modifications, are used to increase the accuracy of navigation measurements. The practical implementation of such filtering algorithms is complicated by their computational complexity and abstract form of representation, which does not reflect all the features of the implementation. That is why the task of synthesizing filtering algorithms that will meet the requirements of guaranteed convergence of the filtering process and minimal computational complexity of their implementation is relevant. The latter requirement is extremely important for navigation systems of small unmanned aerial vehicles, since their on-board equipment must be cheap and low-energy. In this regard, the article presents a parametric synthesis of an optimal algorithm for polynomial filtering of the measurement results of accelerometric orientation sensors in inertial navigation systems of unmanned aerial vehicles. Parametric synthesis refers to the determination of optimal internal parameters, which are the smoothing coefficients of the filter. The synthesis of parameters is performed under the condition of a given filter structure. The filter was synthesized using a method based on the invariance theory and described by the authors in previous works. The optimal smoothing coefficients were determined by conditional optimization of the objective function, which was chosen as the minimum of the mean square error of the estimation. The filter stability conditions, which are determined by an algebraic criterion, are chosen as constraints. Due to the scalar form of implementation, the synthesized optimal filtering algorithm has a low computational complexity. The effectiveness of the algorithm was confirmed by computer simulation based on the results of real measurements of the ADXL345 accelerometer, which is part of the Arduino UNO R3.

Keywords: *smoothing filter; evaluation; measurement; unmanned aerial vehicle; accelerometer; navigation system; filtering algorithm.*

В. В. Поздняков

ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ CFAR ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ГВИНТОМОТОРНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

Статтю присвячено виявленню гармонічних складових у спектрі акустичного сигналу гвинтомоторних засобів повітряного нападу. У прийнятому акустичному сигналі можуть бути наявні гармоніки як одного, так і кількох джерел випромінювання. Аналізуючи значення частот гармонічних складових із урахуванням доплерівського зсуву та їх розподіл уздовж осі частот, можна визначити кількість джерел випромінювання, а також оцінити параметри їх руху. Виявлення гармонічних складових на фоні шуму ускладнене через те, що його спектральна щільність нерівномірна та невідома. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати адаптивний метод порогового оброблення – алгоритм із постійним рівнем хибної тривоги (*constant false alarm rate* – CFAR), який застосовують під час виявлення радіолокаційних сигналів, оскільки він здатний відстежувати зміни рівня шуму. Проаналізовано спектр акустичного сигналу та визначено числові значення параметрів, необхідних для налаштування алгоритму. Проведено порівняння трьох різних підходів до оцінювання рівня фонового шуму й розрахунку порога виявлення. Визначено параметри алгоритму, що дозволяють побудувати поріг, який забезпечує відслідковування перепадів рівня шуму та виявлення як потужних, так і слабких гармонік у спектрі акустичного сигналу.

Результати експерименту показують, що запропонований метод дозволяє виявляти на 45% більше гармонік порівняно з алгоритмом послідовного відкидання середнього значення (*consecutive mean excision*) та на 26% порівняно з алгоритмом ковзного середнього (*moving average*). Отримані результати можуть бути використані для удосконалення наявних та розроблення нових пристроїв і систем акустичного моніторингу повітряного простору.

Ключові слова: засіб повітряного нападу; акустичний сигнал; алгоритм CFAR; частотний спектр; гармонічна складова; поріг.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Для ураження енергетичних та інфраструктурних об'єктів у глибині території держави противник широко застосовує гвинтомоторні засоби повітряного нападу (ЗПН) разом із ракетним озброєнням повітряного, морського та наземного базування. Крім того, вони можуть виконувати функції розвідки, спостереження, відволікання та виснаження систем протиповітряної оборони. Відносно невисока швидкість та висота польоту дає можливість виявляти такі ЗПН акустичними засобами.

Акустичний сигнал гвинтомоторного ЗПН полігармонічний із безперервними за частотою шумовими складовими [1]. Рівень шуму є нерівномірним, тому використання

порога із фіксованим рівнем для розділення сигнальних і шумових відліків у частотній області призведе до пропуску слабких високочастотних гармонічних складових, що погіршить подальші етапи оброблення сигналу, зокрема пошук кратних гармонік.

Для виявлення короткотривалих сигналів на фоні шуму з невідомою і нерівномірною щільністю використовують алгоритми CFAR (constant false alarm rate) [2]. На цей час відома велика кількість модифікацій таких алгоритмів, проте для кожного конкретного випадку (типу сигнально-шумової обстановки) необхідно обрати вид алгоритму та визначити його параметри.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом вчені багатьох країн активно використовують як у теоретичних, так і в прикладних дослідженнях алгоритми CFAR, зокрема їх постійно модифікують, удосконалюють і застосовують у різних галузях оброблення сигналів.

У роботі [3] за допомогою алгоритму CFAR було модифіковано сучасну глибоку нейронну мережу для розв'язання проблеми виявлення різномасштабних суден на радіолокаційних зображеннях. Використовуючи пропозиції об'єктів, згенеровані мережею для захисних інтервалів алгоритму CFAR, цей метод виявляє цілі невеликого розміру. У [4] запропоновано метод регуляції відсіву глибокої нейронної мережі, що ґрунтується на алгоритмі CFAR. Він дозволяє реалізувати адаптивне видалення деяких нейронних вузлів та оптимізацію нейронних вузлів, що беруть участь в обчисленні. Це сприяє зменшенню обсягу зайнятої пам'яті та запобігає надмірній параметризації.

У публікації [5] розглянуто виявлення декількох об'єктів на акустичному зображенні багатопробного гідролокатора. Запропонований метод є ефективним і стійким у багатооб'єктному середовищі, особливо в разі близького їх розташування.

Роботи [6–8] присвячені розробленню методів та підходів на основі використання CFAR-детекторів для виявлення мережеских вторгнень і загроз безпеці в комп'ютерних мережах.

У [9] запропоновано комплексний метод локалізації дефектів кабелю на основі частотної рефлектометрії та алгоритму CFAR. Дані спектра локалізації підставляють у CFAR для отримання порога й вилучення інформації про ефективну амплітуду кабелю та відповідне положення дефекту.

У [10] описано алгоритм виявлення витоків в трубопроводі на основі сигналів акустичних сенсорів за допомогою CFAR детектора. Проведено натурний експеримент та підтверджено можливість застосування такого типу алгоритму для виявлення інцидентів витоків в реальному масштабі часу.

Проте серед усієї сукупності робіт відсутні дослідження щодо адаптації алгоритмів CFAR для виявлення гармонічних складових акустичних сигналів ЗПН.

Формулювання завдання дослідження. Метою дослідження є збільшення кількості виявлених гармонічних складових акустичного сигналу ЗПН за рахунок вибору та адаптації параметрів алгоритму CFAR. Для цього необхідно проаналізувати відомі алгоритми CFAR, умови їх застосування, а також вибрати потрібний та значення його параметрів з урахуванням особливостей структури частотного спектра акустичних сигналів гвинтомоторних ЗПН.

Виклад основного матеріалу**Структура акустичного сигналу гвинтомоторного ЗПН у частотній області**

Акустичний сигнал гвинтомоторних ЗПН, оснащених поршневим двигуном із повітряним гвинтом, є досить складним. Він включає низку гармонічних та безперервних за частотою шумоподібних складових [1]. Частота гармонічних складових є інформаційним параметром сигналу. Його можливо використати для виявлення ЗПН та визначення їх кількості в групах. У прийнятому акустичному сигналі можуть бути наявні гармоніки як одного, так і кількох джерел випромінювання. Аналізуючи значення частот гармонічних складових із урахуванням доплерівського зсуву та їх розподіл уздовж осі частот, можна прийняти рішення про кількість джерел випромінювання, а також оцінити параметри їх руху.

Періодограмні методи отримання спектральних оцінок, що ґрунтуються на перетворенні даних на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) і подальшому їх усередненні, є найбільш стійкими методами спектрального оцінювання, тому можуть бути застосовані майже до всіх класів сигналів і шумів, які володіють стаціонарними властивостями. Крім того, методи спектрального оцінювання, що ґрунтуються на обчисленні ШПФ, є найбільш доцільними щодо обчислювальної складності [11]. Тому в подальшому для розрахунку енергетичного спектра акустичного сигналу будемо використовувати періодограмні оцінки. Розглянемо випадок без усереднення спектральних оцінок.

Спектральна щільність потужності (СЩП) сигналу розраховуємо із використанням періодограми Уелча. Спочатку визначаємо вибіркового спектр зваженого вікном j -го сегмента сигналу за таким виразом:

$$X_j(k) = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} x(n)w(n)e^{-j2\pi\frac{kn}{N_{FFT}}}, \quad (1)$$

де $x(n)$ – n -й відлік прийнятого сигналу;

N_{FFT} – довжина ШПФ;

$w(n)$ – n -й відлік віконної функції.

Сусідні фрагменти сигналу можемо взяти з перекриттям R відліків.

Накопичення M вибіркового енергетичних спектрів дасть оцінку СЩП:

$$P_x(k) = \sum_{j=1}^M |X_j(k)|^2. \quad (2)$$

На рис. 1 показано графік СЩП акустичного сигналу гвинтомоторного ударного безпілотного літального апарата (БпЛА), отриманий із такими параметрами періодограми: $N_{FFT} = 8192$, $M = 3$, $R = 0,5 N_{FFT}$ – та прямокутним вікном. Частота дискретизації становить $F_s = 44,1$ кГц, що є стандартним значенням для більшості пристроїв звукозапису. Гармонічні складові спектра, промодульовані шумовою складовою, слідує на частотах, кратних до обертів двигуна. Амплітуда гармонік зменшується зі збільшенням частоти, проте можемо спостерігати, що деякі гармоніки з більшою частотою перевищують попередні, а деякі взагалі не розрізняються на фоні шуму.

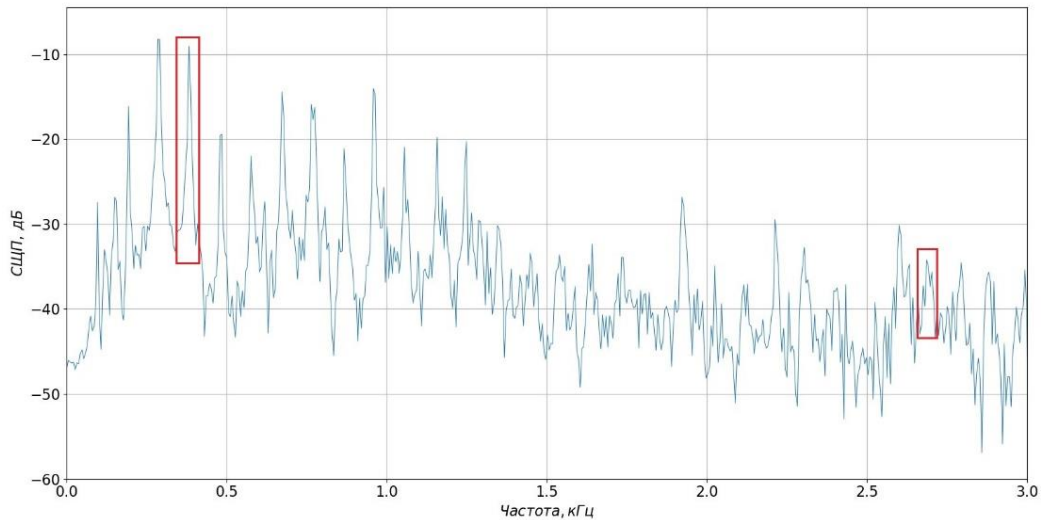


Рис. 1. Графік СЩП акустичного сигналу гвинтомоторного БпЛА

Це відбувається, тому що на акустичні хвилі під час їх поширення впливає багато факторів (температура повітря, опади, вітер, вологість тощо), крім того, інтенсивність акустичного поля в точці реєстрації сигналу змінюється під час маневрування ЗПН. Отже, можна зробити висновок, що амплітуда гармонічних складових має випадковий характер та є неінформативним параметром.

Середній рівень шуму розподілений нерівномірно, має перепади в межах 5–10 дБ. Зі збільшенням частоти спостерігається зниження потужності як гармонічних, так і шумових складових. Це пов'язано з атмосферним затуханням. Коефіцієнт затухання здебільшого залежить від частоти звуку, до 1 кГц його вплив незначний, крім того, на нього впливають температура та вологість повітря.

Гармоніка акустичного сигналу не є ідеальним коливанням чистого тону, а займає певну ширину. На рис. 2 показано збільшене зображення гармонік акустичного сигналу гвинтомоторного ЗПН на частотах близько 380 Гц та 2680 Гц, що виділені прямокутниками на рис. 1. Ширина піка на рівні шуму становить близько 40 Гц. Його форма з вищою частотою більш розширена, що спричинено проявом ефекту Доплера.

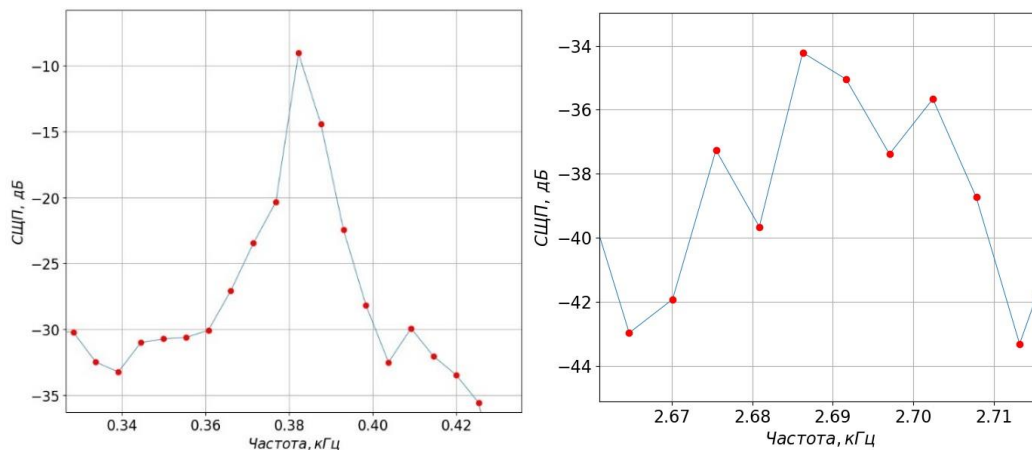


Рис. 2. Гармоніки акустичного сигналу гвинтомоторного БпЛА

Для вказаних вище частоти дискретизації та розміру вікна періодограми така ширина піка становить $K_p = 8$ відліків частотного спектра, а період їх слідування – $K_c = 18-19$ відліків.

У груповому сигналі БпЛА, зображеному на рис. 3, спостерігаються розширені гармоніки за рахунок множення піків, що наведені на рис. 4. Це відбувається, тому що акустичні випромінювання від кількох БпЛА одночасно приходять на мікрофон, проте частоти гармонічних складових не збігаються, оскільки вони залежать від положення БпЛА відносно мікрофона, його швидкості та режиму роботи двигуна. Коли невідповідність частот є більшою, ніж ширина гармоніки сигналу окремого ЗПН, вони спостерігаються окремо. Розмір розширених гармонік коливається і становить від 18 до 25 частотних відліків.

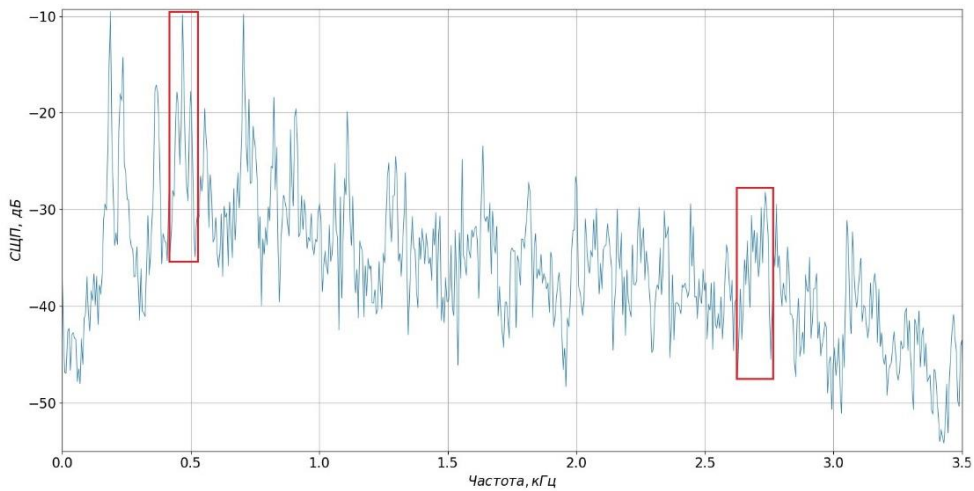


Рис. 3. Графік СШП групового акустичного сигналу трьох БпЛА

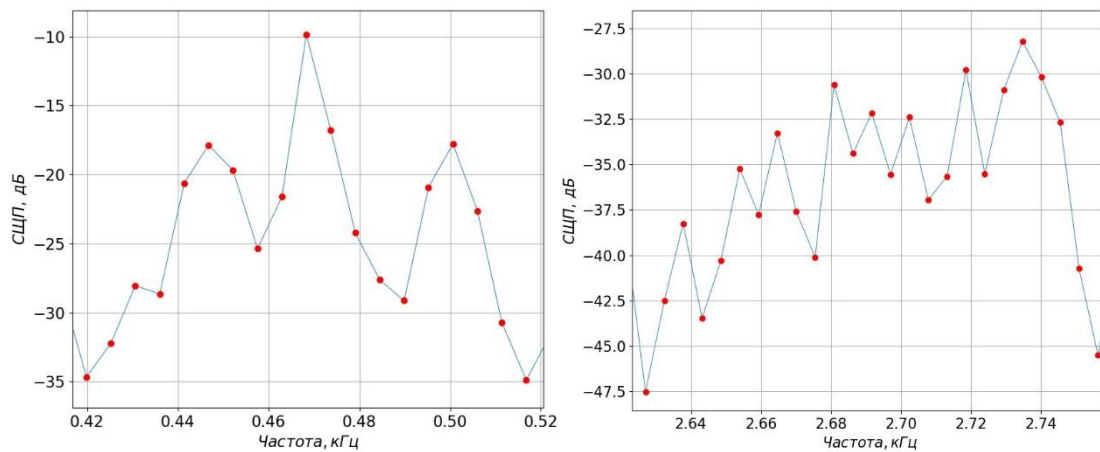


Рис. 4. Гармоніки групового акустичного сигналу трьох БпЛА

Отже, груповий акустичний сигнал гвинтомоторних ЗПН насичений гармонічними складовими та має значні коливання рівня шуму, тому метод виявлення гармонік із фіксованим порогом не ефективний. Для виявлення більшої кількості гармонічних складових доцільно використовувати адаптивні методи порогового оброблення, які здатні відстежувати зміни рівня шуму та гармонічних складових. До таких методів належать

алгоритми CFAR, які досить широко використовують під час виявлення радіолокаційних сигналів [12].

Аналіз відомих алгоритмів CFAR та особливостей їх застосування

Алгоритм CFAR – це адаптивний метод порогового оброблення, який досить широко використовують у радіолокації для виявлення цілей в умовах нерівномірного рівня шуму, впливу перешкод та інтерференції сигналів. Завдяки адаптивності рівня порога, він здатний забезпечити кращий показник якості виявлення, ніж метод із фіксованим порогом, ефективність якого погіршується в разі зміни відношення сигнал / шум [2].

В алгоритмі CFAR середня потужність шуму оцінюється за допомогою ковзного вікна, центром якого є тестовий відлік (ТВ), який перевіряється на наявність у ньому енергії відбитого сигналу. Воно включає захисні інтервали K_s та інтервали оцінювання K_e з обох боків від ТВ. Будову ковзного вікна алгоритму зображено на рис. 5. Рівень шуму ТВ оцінюють на основі статистики відліків переднього K_{ef} та заднього K_{er} оцінних інтервалів. Відліки захисних інтервалів K_s не використовують для оцінювання рівня шуму, оскільки вони можуть містити значення, пов'язані з ТВ, що призведе до зміщення оцінки рівня шуму.

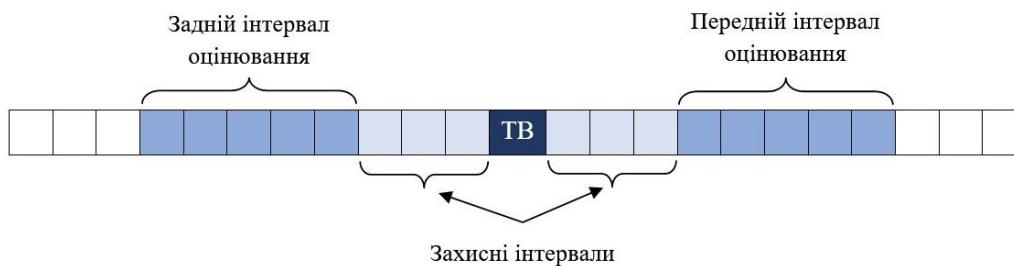


Рис. 5. Будова ковзного вікна

Ковзне вікно рухається масивом даних, переміщуючись щоразу на один відлік. У кожній позиції приймається рішення про виявлення – перевищення ТВ порогового рівня, визначеного на основі шуму в інтервалі K_e . Є декілька підходів до оцінювання рівня фонового шуму, які використовують за різних умов середовища поширення хвиль та сигнальної обстановки. Розглянемо деякі з них.

Усереднення за комірками CFAR (cell averaging – CA-CFAR) є одним із найпростіших методів оброблення. Рівень шуму ТВ розраховується як середнє значення відліків в інтервалі K_e :

$$\sigma_i = \frac{1}{K_e} \sum_{k=1}^{K_e} P_x(k). \quad (3)$$

На його основі визначають поріг виявлення за таким виразом:

$$T = \alpha \cdot \sigma, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт масштабування, який є функцією ймовірності хибної тривоги P_{FA} та кількості відліків в інтервалі K_e .

Поріг виявлення змінюється залежно від рівня шуму і має вище значення з обох боків від відліків, що містять енергію відбитого сигналу. Цей метод оптимальний для рівномірного розподілу фоновому шуму. Його недоліком є маскування близько розташованих сигналів у багатосигнальному середовищі. Ефект маскування спостерігається тоді, коли близько розташований сигнал, який не пов'язаний із сигналом у ТВ, потрапляє в інтервал оцінювання та зміщує порогове значення.

Алгоритм CFAR, у якому для розрахунку порога використовуються відліки тільки одного з інтервалів оцінювання (K_{ef} або K_{er}), може виявляти два близькі сигнали. У цьому методі рівень шуму визначають окремо для K_{ef} та K_{er} , потім беруть менше з двох значень (smallest of CA – SOCA-CFAR) та обчислюють пороговий рівень. Якщо присутні більше двох близьких сигналів, то такий алгоритм може виявити тільки один із них.

Більш досконалим підходом до оцінювання шуму є метод, у якому відліки інтервалу K_e спочатку впорядковуються від найменшого до найбільшого значення (order statistics CFAR – OS-CFAR). Із упорядкованої послідовності беруть k -й найбільший відлік як рівень шуму. Цей метод стійкий у багатосигнальному середовищі, проте має більшу обчислювальну складність.

До загальних недоліків алгоритмів CFAR належить можливе самотмаскування широкосмугових сигналів та втрати у відношенні сигнал / шум. Ефект самотмаскування виникає тоді, коли ширина смуги сигналу є більшою, ніж захисний інтервал. Інший дефект пов'язаний із тим, що поріг CFAR у середньому є вищим, ніж поріг, побудований за критерієм Неймана – Пірсона для відомих параметрів розподілу шуму [12].

Вибір типу алгоритму та його параметрів

Параметрами, які встановлюють для конкретної реалізації алгоритму CFAR, є величини інтервалів K_s та K_e , а також значення ймовірності хибної тривоги P_{FA} . Ефективність алгоритму CFAR залежить від їх налаштувань. У цьому дослідженні алгоритм CFAR використовуємо для виявлення гармонік в акустичному сигналі, тому розміри інтервалів задаємо, виходячи з їх ширини та періоду слідування.

У ході дослідження було встановлено, що захисний інтервал повинен бути принаймні більшим за ширину гармоніки акустичного сигналу $K_s > K_p$, щоб відліки, які належать до неї, не використовувалися для визначення рівня шуму. Інтервали оцінювання, у свою чергу, не повинні перевищувати відстані між сусідніми гармоніками $K_{ef} < K_c$, $K_{er} < K_c$. Недотримання цих вимог призведе до зміщення оцінки рівня шуму та порога виявлення. Для акустичного сигналу одного БПЛА встановлюємо такі значення параметрів: $K_s = 5$, $K_e = 18$ і $P_{FA} = 10^{-2}$.

У спектрі акустичного сигналу можуть бути присутні інтервали, де гармоніки слабко виділяються на фоні шуму (наприклад, смуга частот від 1,2 кГц до 2,2 кГц (рис. 1)) і, відповідно, їх складніше виявляти порівняно з більш потужними. На рис. 6 показано результат роботи алгоритмів CA-CFAR, SOCA-CFAR, OS-CFAR на саме такому інтервалі. Як видно, форма порога кожного алгоритму відслідковує піки гармонік акустичного сигналу. Проте рівні CA-CFAR та SOCA-CFAR є дещо вищими, ніж OS-CFAR, що призводить до пропуску ними деяких піків.

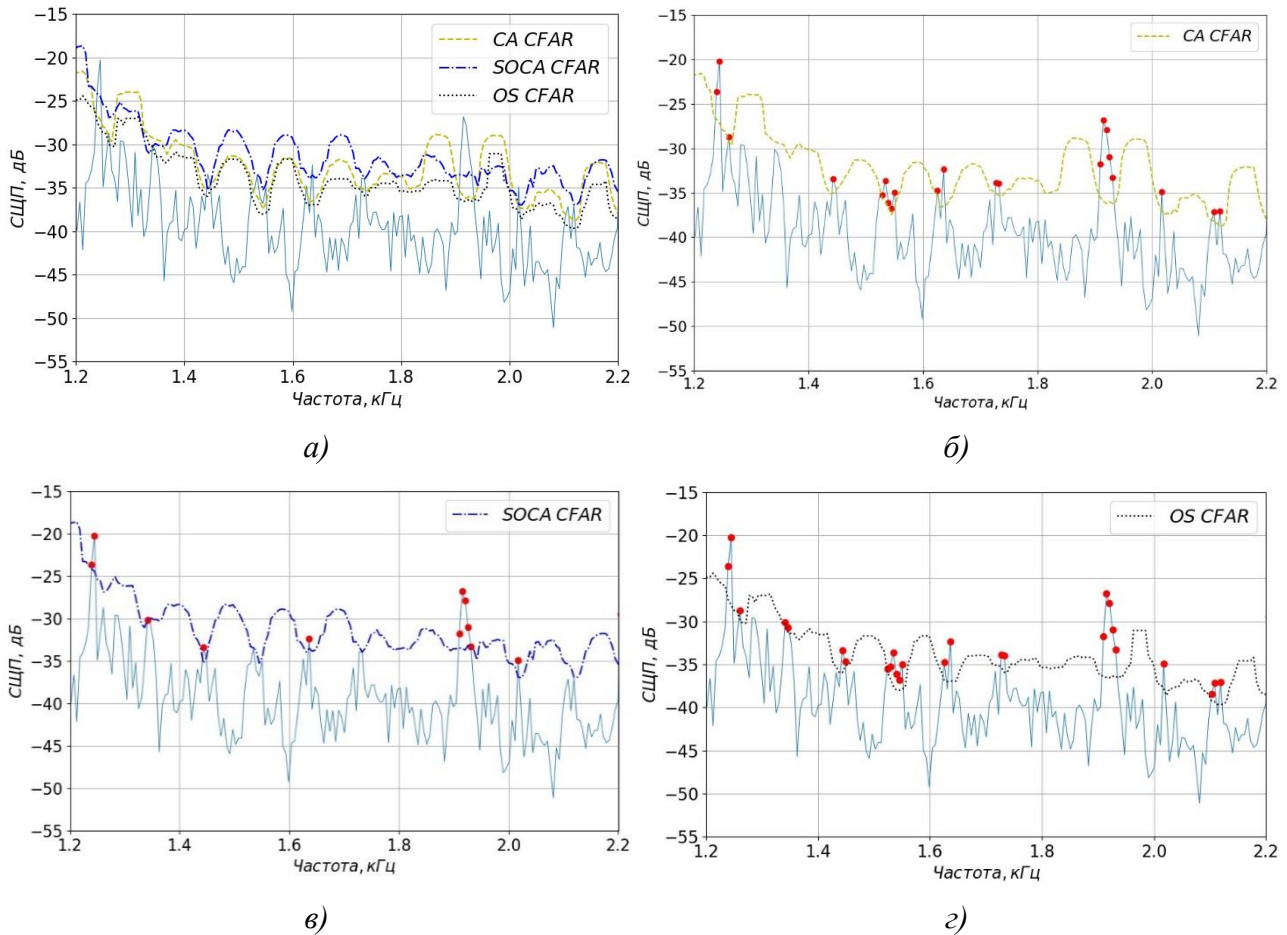


Рис. 6. Виявлення гармонік акустичного сигналу одного БнЛА: а) порівняння алгоритмів; б) CA-CFAR; в) SOCA-CFAR; з) OS-CFAR

Значення хибної тривоги в цьому дослідженні не настільки критичне, як у роботі радіолокатора, тому що виявлені частоти гармонік підлягають подальшому логічному обробленню, а помилкові значення будуть відфільтровуватися, тому можна обирати його таким, що забезпечить виявлення якнайбільшої кількості піків гармонічних складових.

У разі групового акустичного сигналу процес виявлення гармонік значно ускладнюється. Множина піків із різною шириною та періодом слідування потребує більш гнучкого підходу. На рис. 7а показано роботу алгоритмів CFAR із тими самими налаштуваннями, що й у попередньому випадку. Проявляється ефект маскуванню близьких піків, а форма порога не відповідає коливанню рівня шуму в сигналі.

Для виявлення більшої кількості гармонік потрібно збільшити інтервал K_s до ширини груп гармонік та визначити величину інтервалу K_e . Як бачимо, недостатня його ширина (рис. 7б) призводить до значних флуктуацій порогового рівня, тому що лише невелика кількість відліків шуму використовується для обчислень. Крім того, в інтервал K_e потрапляють гармоніки сигналу та зміщують поріг. Варто зазначити, що надто велике значення K_e збільшує час обчислення, що впливає на продуктивність системи в реальному масштабі часу. Рис. 7в та рис. 7г ілюструють роботу алгоритмів зі значеннями $K_e = 20$ та $K_e = 30$ відліків відповідно.

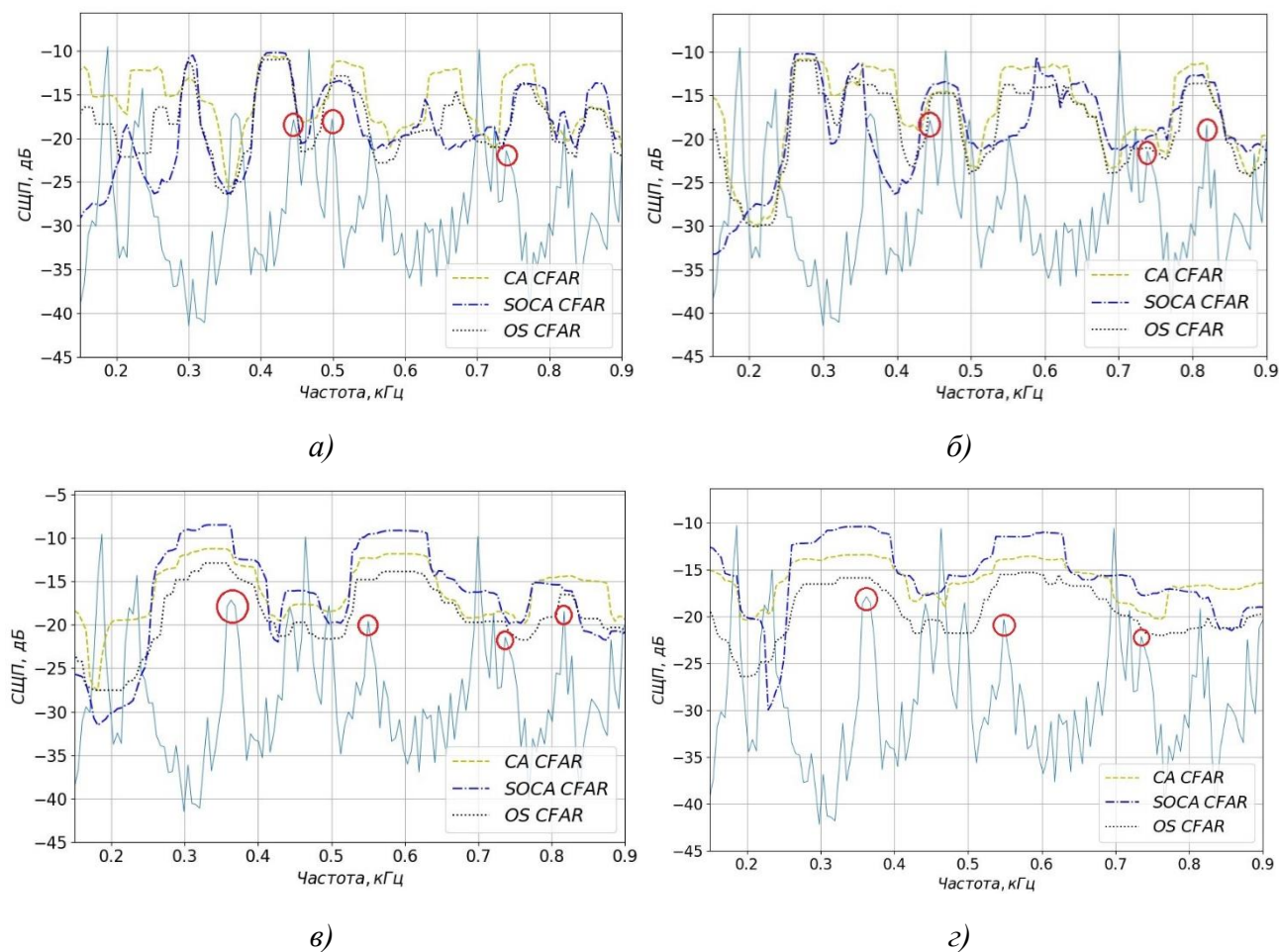
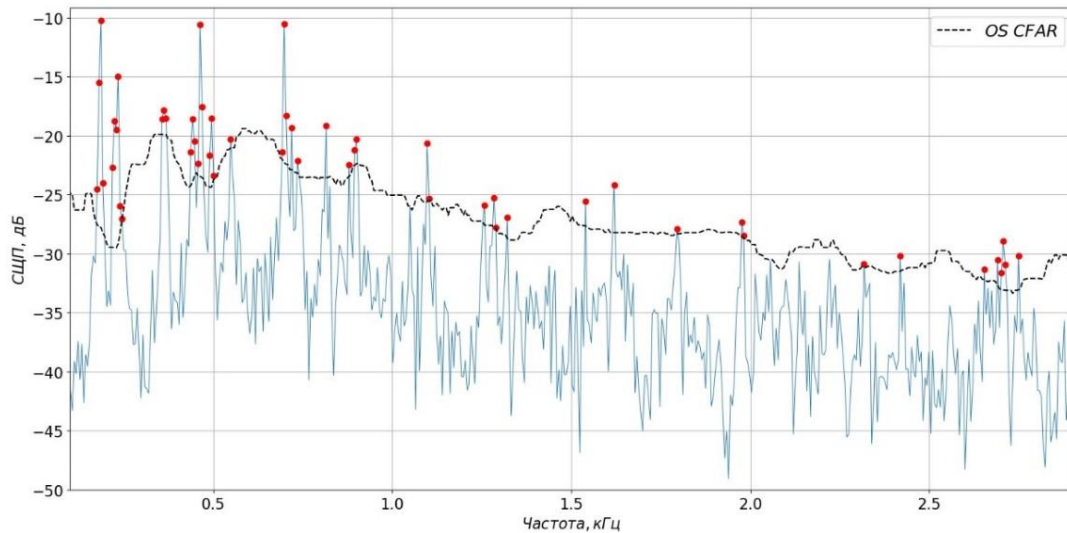


Рис. 7. Виявлення гармонік групового акустичного сигналу БПЛА за різних інтервалів K_s та K_e : а) 5, 9; б) 12, 9; в) 12, 20; г) 12, 30

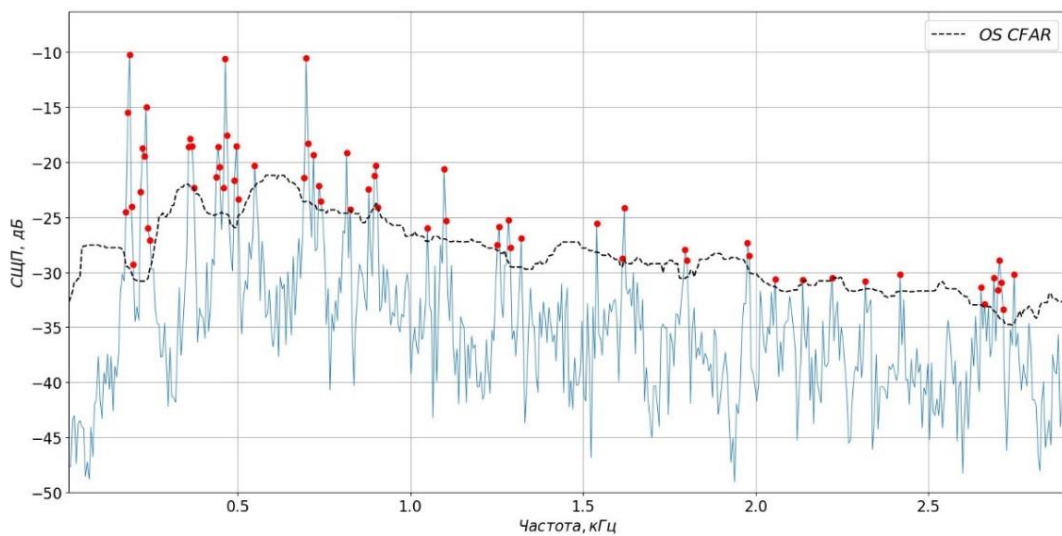
Із викладеного вище випливає, що в разі збільшення K_e поріг алгоритму OS-CFAR помітно знижується порівняно із CA-CFAR та SOCA-CFAR, а його форма стає більш гладкою. Це можна пояснити принциповою відмінністю в обчисленні рівня порога. Досліджуваний алгоритм дозволяє відкинути будь-яку кількість відліків, що містять енергію гармонічних складових, а також оцінити рівень шуму за допомогою більш широкого інтервалу значень.

Нижче на рис. 8 показано роботу алгоритму OS-CFAR із груповим акустичним сигналом у смузі частот до 3 кГц. Як бачимо, зменшення номера k -го відліку з упорядкованої статистики значень інтервалу K_e спричиняє зниження поріга виявлення, а також зменшує крутість і розмах його перепадів. Це, у свою чергу, дозволяє збільшити кількість виявлених гармонік, що продемонстровано на рис. 8б на частотах від 2 кГц до 2,5 кГц.

Отже, у результаті проведеного аналізу можна дійти висновку, що алгоритм OS-CFAR дозволяє виявляти близькі піки в груповому акустичному сигналі гвинтомоторних БПЛА як в області низьких частот, де гармоніки значно перевищують рівень шуму, так і більш високочастотні, які слабо виділяються на його фоні.



а)



б)

Рис. 8. Виявлення гармонік групового акустичного сигналу БпЛА алгоритмом OS-CFAR:
а) $k = 0,6 K_e$; б) $k = 0,5 K_e$

Дослідження запропонованого підходу

Для визначення вирашу в кількості виявлених гармонік порівняно з подібними методами виявлення, які не потребують попереднього оцінювання шуму, був проведений експеримент, у результаті якого встановлено, що алгоритм OS-CFAR виявляє в середньому на 45% більше гармонік, ніж алгоритм послідовного відкидання середнього значення СМЕ (consecutive mean excision) [13], та на 26% більше порівняно з алгоритмом ковзного середнього (moving average – MA). Тестування проводилося із використанням 100 реалізацій групового акустичного сигналу БпЛА в смузі частот від 0 кГц до 3 кГц. Приклад наведено на рис. 9.

Можемо зробити висновок, що алгоритм СМЕ працює на ділянках, де рівень шуму є рівномірним, проте не відслідковує інтервали, коли потужність шумових та гармонічних складових зменшується через атмосферне затухання.

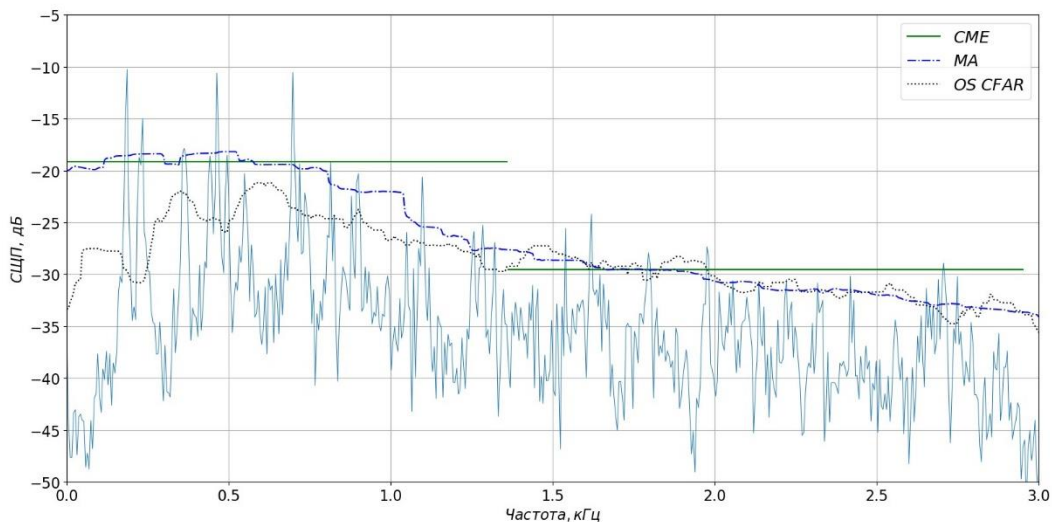


Рис. 9. Порівняння методів виявлення гармонічних складових сигналу

А алгоритм МА працює краще в смузі частот вище 1 кГц, де гармоніки незначно перевищують рівень шуму. У смузі частот до 1 кГц він пропускає менш потужні піки в групових гармоніках. Це є негативним фактором, тому що їх наявність свідчить про кількість окремих джерел акустичного сигналу.

Висновки. У ході дослідження встановлено, що для виявлення максимальної кількості гармонічних складових акустичного сигналу гвинтомоторного ЗПН доцільно використовувати алгоритм OS-CFAR. Проведений експеримент показав, що за відповідних налаштувань параметрів алгоритму ($K_s = 12$, $K_e = 30$ для $F_s = 44,1$ кГц) запропонований метод може надати кращий результат порівняно з іншими методами виявлення.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення наявних та розроблення нових пристроїв і систем акустичного моніторингу повітряного простору.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у розробленні алгоритмів логічного оброблення виявлених гармонічних складових для розділення кількості ЗПН у груповому акустичному сигналі.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Поздняков В. В., Бугайов М. В. Аналіз акустичних сигналів засобів повітряного нападу // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2023. Вип. 25 (I). С. 58–75. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06>
2. Mark A. Richards. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2nd Ed. 2014. ISBN: 978-0-07-179832-7.
3. A Modified Faster R-CNN Based on CFAR Algorithm for SAR Ship Detection / M. Kang, X. Leng, Z. Lin et al. // International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP). Shanghai, China, 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/RSIP.2017.7958815>
4. Dropout Regularization Method of Convolutional Neural Network Based on Constant False Alarm Rate / Xiao Jialin, LI Yu, Yuan Qinglong et al. // Journal of East China University of

Science and Technology. 2022. Vol. 48 (1). P. 87–98. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20201127005>

5. Fast Two-Dimensional Subset Censored CFAR Method for Multiple Objects Detection from Acoustic Image / Jue Gao, Haisen Li, Baowei Chen et al. // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017. Vol. 11, Iss. 3. P. 505–512. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0322>

6. He Di, Leung Henry. Network Intrusion Detection Using CFAR Abrupt-Change Detectors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. March 2008. Vol. 57, № 3. P. 490–497. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.910108>

7. He Di, Leung Henry. Network Intrusion Detection Using a Stochastic Resonance CFAR Technique // Circuits Syst Signal Process. 2009. Vol. 28. P. 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00034-008-9087-y>

8. A Robust Anomaly Detection Method Using a Constant False Alarm Rate Approach / AsSadhan B., AlShaalan R., Diab D. M. et al. // Multimed Tools Appl. 2020. Vol. 79. P. 12727–12750. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08653-8>

9. Location Method for Cable Defects Based on Frequency Domain Reflectometry-Constant False Alarm Rate / B. Wang, S. Li, A. Li et al. // 20th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC–2024). Shanghai, China, 2024. P. 183–189. <https://doi.org/10.1049/icp.2024.2274>

10. An G., Huang Z., Li Y. Constant False Alarm Rate Detection of Pipeline Leakage Based on Acoustic Sensors // Sci Rep. 2023. № 13. P. 14149. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41177-3>

11. Kundu D., Nandi S. Statistical Signal Processing: Frequency Estimation. Springer, New Delhi, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2012. 141 p.

12. Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm. Principles of Modern Radar. Vol. I: Basic Principles. 2010. ISBN: 978-1-891121-52-4. <https://doi.org/10.1049/sbra021e>

13. Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms / J. Vartiainen, J. Lehtomäki, H. Saarnisaari et al. // Journal of Electrical and Computer Engineering. 2010. P. 459623. <https://doi.org/10.1155/2010/459623>

Стаття надійшла до редакції 08.04.2025.

REFERENCES

1. Pozdniakov, V. V., Buhaiov, M. V. (2023). Analiz akustychnykh syhnaliv zasobiv povitrianoho napadu [Acoustic Signals Analysis of Aerial Attack Weapon]. *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]*, 25 (I), 58–75. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06> [in Ukrainian].

2. Mark, A. (2014). Richards. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2nd Ed. ISBN: 978-0-07-179832-7.

3. Kang, M., Leng, X., & Lin, Z. et al. (2017). A Modified Faster R-CNN Based on CFAR Algorithm for SAR Ship Detection. In *International Workshop on Remote Sensing with*

4. Xiao Jialin, LI Yu, & Yuan Qinglong et al. (2022). Dropout Regularization Method of Convolutional Neural Network Based on Constant False Alarm Rate. *Journal of East China University of Science and Technology*, 48 (1), 87–98. <https://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20201127005>
5. Jue Gao, Haisen Li, Baowei Chen et al. (2017). Fast Two-Dimensional Subset Censored CFAR Method for Multiple Objects Detection from Acoustic Image. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 11, 3, 505–512. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0322>
6. He Di, Leung Henry. (2008). Network Intrusion Detection Using CFAR Abrupt-Change Detectors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57, 3, 490–497. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.910108>
7. He Di, Leung Henry. (2009). Network Intrusion Detection Using a Stochastic Resonance CFAR Technique. *Circuits Syst Signal Process*, 28, 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00034-008-9087-y>
8. AsSadhan, B., AlShaalan, R., & Diab, D. M. et al. (2020). A Robust Anomaly Detection Method Using a Constant False Alarm Rate Approach. *Multimed Tools Appl*, 79, 12727–12750. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-08653-8>
9. Wang, B., Li, S., & Li, A. et al. (2024). Location Method for Cable Defects Based on Frequency Domain Reflectometry-Constant False Alarm Rate. In *20th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC–2024)*. Shanghai, China. (pp. 183–189). <https://doi.org/10.1049/icp.2024.2274>
10. An, G., Huang, Z., & Li, Y. (2023). Constant False Alarm Rate Detection of Pipeline Leakage Based on Acoustic Sensors. *Sci Rep.*, 13, 14149. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41177-3>
11. Kundu, D., & Nandi, S. (2012). *Statistical Signal Processing: Frequency Estimation*. Springer, New Delhi, Heidelberg, New York, Dordrecht, London.
12. Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm. (2010). *Principles of Modern Radar. Vol. I: Basic Principles*. ISBN: 978-1-891121-52-4. <https://doi.org/10.1049/sbra021e>
13. Vartiainen, J., Lehtomäki, J., & Saarnisaari, H. et al. (2010). Analysis of the Consecutive Mean Excision Algorithms. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 459623. <https://doi.org/10.1155/2010/459623>

V. V. Pozdniakov

CFAR ALGORITHM APPLICATION FOR DETECTING ACOUSTIC SIGNALS HARMONIC COMPONENTS OF PROPELLER AERIAL ATTACK WEAPON

The article is devoted to the detection of harmonic components in the acoustic signal spectrum of propeller aerial attack weapon. The received acoustic signal may contain harmonics of both one and several radiation sources. By analyzing the frequency values of the harmonic components with regard to the Doppler shift and their distribution along the frequency axis, it is possible to determine the number of radiation sources and estimate their motion parameters.

Detecting harmonic components in the background noise is difficult because its spectral density is uneven and unknown. To solve this problem, it is proposed to use an adaptive thresholding method, an algorithm with a constant false alarm rate, which is used to detect radar signals, as it is able to track changes in noise levels. The spectrum of the acoustic signal is analyzed and the numerical values of the parameters necessary for tuning the algorithm are determined. A comparison was made between three different approaches to assessing background noise levels and calculating detection thresholds, including cell averaging-, smallest-of cell averaging-, and order statistics- constant false alarm rate. The parameters of the algorithm have been determined, which allow us to build a threshold that provides tracking of noise level changes and detection of both strong and weak harmonics in the spectrum of an acoustic signal.

The experimental results show that the proposed method allows detecting 45% more harmonics compared to the consecutive mean excision algorithm and 26% more harmonics compared to the moving average algorithm. The results obtained can be used to improve existing and develop new devices and systems for acoustic monitoring of airspace.

Keywords: *aerial attack weapon; acoustic signal; CFAR algorithm; frequency spectrum; harmonic component; threshold.*

Б. М. Жураківський, Л. М. Наумчак, М. П. Романчук, М. В. Танцюра

АНАЛІЗ ПОХИБКИ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ ОБЧИСЛЕННЯ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ НА МАТЕРІАЛАХ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ З БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Обчислення географічних координат об'єктів на матеріалах повітряної розвідки з безпілотних літальних апаратів за умов протидії засобам радіоелектронної боротьби противника є актуальною проблемою, розв'язання якої дозволяє підвищити ефективність застосування цього виду озброєння для виконання військових завдань. Зокрема, якісне оброблення матеріалів повітряної розвідки, отриманих із безпілотних літальних апаратів в умовах відсутності сигналів системи глобального позиціонування GNSS, за рахунок використання вдосконалених алгоритмів і методів сприятиме підвищенню точності та оперативності визначення координат наземних об'єктів. У статті запропоновано алгоритм, що дозволяє на рівнинній місцевості отримувати з високою точністю координати об'єктів на матеріалах повітряної розвідки. Для цього оператор вибирає чотири точки, які видно і на розвідувальних матеріалах, і на еталонних зображеннях, що мають прив'язку до географічних координат, оскільки вони дозволяють обчислити географічні координати довільної точки на матеріалах повітряної розвідки. Точність координат буде вищою для об'єктів, що знаходяться всередині чотирикутника з вершинами у вибраних точках. Позначені ключові точки дозволяють здійснити проєктивне перетворення, що відображає, як піксельні координати об'єкта на фотознімку з безпілотного літального апарата трансформуються в географічні. Для високої точності обчислення координат об'єкта ключові точки необхідно вибирати навколо нього, тобто таким чином, щоб він знаходився всередині чотирикутника з вершинами в них. У результаті проведених симуляцій максимальна помилка всередині чотирикутника з ключових точок становить менше 2 м, а максимальна похибка зовні – близько 17 м. Середня похибка всередині цього чотирикутника була трохи більше 0,5 м, а зовні – близько 1 м. Після проведення симуляцій роботу вдосконаленого алгоритму було перевірено в натурних випробуваннях. Для цього було вибрано декілька ділянок місцевості, визначено координати об'єктів, що на них знаходилися. Їх обліт здійснювався декількома безпілотними літальними апаратами типу крило. Дані, отримані під час натурних випробувань, не дуже відрізняються від отриманих під час симуляцій.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс; безпілотний літальний апарат; алгоритм; комп'ютерний зір; радіоелектронна боротьба; проєктивне перетворення; аналіз похибки.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Враховуючи бойовий досвід застосування безпілотних авіаційних комплексів (БПАК) в умовах збройної агресії рф, можна стверджувати, що чинна методика визначення координат наземних об'єктів в умовах

© Б. М. Жураківський, Л. М. Наумчак, М. П. Романчук, М. В. Танцюра, 2025

подавлення засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) сигналів GNSS не є ефективною. У сучасній війні між технологічно розвиненими противниками відбувається інтенсивне застосування засобів РЕБ. В умовах радіоелектронного подавлення (РЕП) оператори корисного навантаження змушені вручну визначати координати наземних об'єктів (засічок), зіставляючи орієнтири на сторонніх програмних продуктах, що, у свою чергу, знижує оперативність та має негативний вплив на точність. За таких умов особливої актуальності набуває завдання обчислення географічних координат об'єктів, що знаходяться на матеріалах повітряної розвідки (МПР), які надходять з безпілотного літального апарата (БпЛА) без використання супутникових систем глобального позиціонування. Однією із важливих задач є аналіз похибки обчислених координат БпЛА.

Відповідно, перед закордонними та вітчизняними науковцями постає питання вдосконалення програмних алгоритмів оброблення локалізації БпЛА та визначення координат об'єктів на земній поверхні з певною точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обчислення координат об'єкта на МПР із БпЛА є актуальною проблемою, яку досліджують у великій кількості наукових робіт. Зокрема, в [1] автори зосередилися на обчисленні координат об'єкта в системі координат камери, що знаходиться на БпЛА. Надалі, знаючи GPS координати та орієнтацію БпЛА, а також позицію об'єкта відносно нього, можна отримати абсолютні координати об'єкта на земній поверхні, що знаходиться в полі зору камери. У роботі [2] використали фотознімки з кількох БпЛА для обчислення координат об'єкта. Для локалізації також можна брати до уваги його точні фізичні розміри, якщо вони відомі [3]. Крім того, у [4] запропоновано реалізувати бортову інтелектуальну інформаційно-розрахункову систему автономної навігації. Перевагами згаданого дослідження є можливість застосування неідентичних засобів знімання, але не передбачено можливості визначення координат та видачі їх операторові цільового навантаження в режимі реального часу. У публікації [5] для обчислення координат об'єкта здійснено його трекінг та використано фотознімки з БпЛА з трьох різних ракурсів. У [6, 7] за допомогою YOLO детектора автоматизовано пошук об'єкта на фотознімку з БпЛА, а також враховано GPS координати дрона і позицію об'єкта на фотознімку для обчислення його координат. Альтернативним способом визначення координат об'єкта є застосування БпЛА, оснащеного стереокамерою [8]. Однак для високої точності отриманих координат сам об'єкт повинен знаходитися близько до неї. Загалом у більшості досліджень для обчислення географічних координат об'єктів на фотознімку з БпЛА використовують системи глобального позиціонування (GPS та аналоги). Наприклад, за допомогою системи глобального позиціонування, компаса та інерційних вимірювальних пристроїв визначають координати та орієнтацію БпЛА. Знаючи кути повороту камери та піксельні координати цілі на фотознімку, можна обчислити рівняння прямої, на якій знаходиться БпЛА та об'єкт, а також перетин цієї прямої з поверхнею землі. Недоліком описаного методу є необхідність використання системи глобального позиціонування, що ненадійно в умовах сучасних бойових дій, зокрема через РЕП противника. Спудфінг сигналів GNSS може непомітно вносити похибку в отримані GPS координати БпЛА навіть у разі спроби його детекції за допомогою аналізу даних інерційних вимірювальних пристроїв та даних системи глобального позиціонування

на БпЛА [9]. Ще одним недоліком цього методу є нестійкість похибки обчислених координат об'єктів відносно похибки визначення орієнтації БпЛА в просторі за умови зростання відстані від БпЛА до об'єкта.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є перевірка похибки вдосконаленого алгоритму визначення координат наземних об'єктів в умовах впливу засобів РЕБ противника на БпЛА для підвищення точності та оперативності в разі відсутності сигналів GNSS, але за можливості використання каналу передавання відеоданих.

Виклад основного матеріалу. Оцінимо похибку обчислення координат наземного об'єкта, якщо позицію та орієнтацію БпЛА визначено за допомогою GNSS, компаса та інерційних вимірювальних пристроїв, а координати об'єкта обраховано як перетин із земною поверхнею прямої, що проходить через отримані координати БпЛА в обчисленому напрямку.

Надалі будемо припускати, що за необхідності визначення координат об'єкта на МПР приймаються такі умови:

поверхня землі, що потрапляє на МПР, абсолютно рівна;

об'єкт знаходиться на земній поверхні;

позиція БпЛА була обрахована з нульовою похибкою.

За цих припущень похибку обчислення координат об'єкта визначаємо в такий спосіб:

$$\Delta O = \sqrt{h^2 + d^2} \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)}, \quad (1)$$

де h – висота, на якій знаходиться БпЛА;

d – відстань по горизонталі від БпЛА до об'єкта;

α – кут між поверхнею землі та прямою, що проходить через БпЛА й наземний об'єкт;

β – похибка в обчисленні орієнтації до БпЛА, яка призвела до того, що визначена пряма до об'єкта проходить у тій же вертикальній площині, що і пряма до об'єкта й над нею під кутом β градусів.

Тобто похибка буде понад 110 м, якщо $h = d = 1000$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 3^\circ$. Вона лінійно зростатиме в разі збільшення h та/або d .

Приклад визначення похибки обчислення координат об'єкта наведено на рис. 1.

Припустимо, що до поверхні землі в рівнинній області, над якою знаходиться БпЛА, застосовано прямокутну систему координат у метрах (наприклад, УСК 2000 або WGS-84), а для точок у просторі над земною поверхнею як третю координату використано їх висоту. Для підвищення точності отриманих координат необхідно застосувати калібрування камери, щоб прямі у ході проєкції на матрицю переходили у прямі. Надалі припускаємо, що камера вже відкалібрована. Наявність еталонного зображення з прив'язкою до географічних координат означає, що ми маємо функцію P_s , яка кожній піксельній координаті $s = (s_1, s_2)$ на еталонних зображеннях ставить у відповідність географічні координати конкретної точки на земній поверхні $c = (c_1, c_2)$.

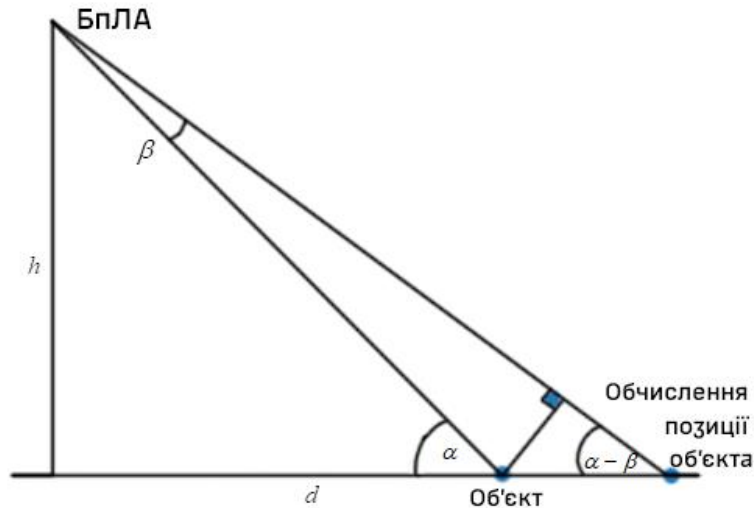


Рис. 1. Приклад визначення похибки обчислення координат об'єкта

Надалі будемо позначати образ проєктивного перетворення точки x (відповідного матриці A) як лінійне перетворення двовимірної проєктивної площини:

$$Ax = \left(\frac{a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}}{a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}}, \frac{a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}}{a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}} \right), \quad (2)$$

де $A = (a_{ij})_{i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 3}$ – матриця 3×3 ;

$x = (x_1, x_2)$ – двовимірні координати.

Проєкція точок із поверхні землі на МПР із БПЛА є проєктивним перетворенням з площини на земній поверхні в площину піксельних координат на МПР із БПЛА, тобто є 3×3 матриця $Q = (q_{ij})_{i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 3}$ така, що

$$p = Qc, \quad (3)$$

де $c = (c_1, c_2)$ – географічні координати точки на земній поверхні;

$p = (p_1, p_2)$ – піксельні координати відповідної точки на МПР із БПЛА [2].

Обернена функція до двовимірного проєктивного перетворення також є двовимірним проєктивним перетворенням [2]. Для визначення двовимірного проєктивного перетворення достатньо задати його значення в чотирьох ключових точках загального положення [2]. Для цього оператор може позначити їх відповідність, це видно і на МПР з БПЛА, і на еталонних зображеннях (наприклад, перетини доріг, стовпи, кути будинків, дерева чи кущі, що чимось виділяються), як показано на рис. 2, на якому зверху зображено фотознімок із БПЛА, а знизу – частину супутникового знімка, що має прив'язку до конкретних географічних координат. Використовуючи прив'язку еталонних зображень до географічних координат, можна отримати географічні координати позначених чотирьох точок.



Рис. 2. Знімок із БпЛА

Нехай $p^{(i)} = (p_1^{(i)}, p_2^{(i)})_{i=1, \dots, 4}$ – піксельні координати чотирьох позначених на МПР точок; $s^{(i)} = (s_1^{(i)}, s_2^{(i)})_{i=1, \dots, 4}$ – піксельні координати відповідних позначених точок на еталонному зображенні; $Q = (q_{ij})_{i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 3}$ – матриця проєктивного перетворення з площини піксельних координат на еталонному зображенні в площину їх географічних координат. Визначимо $c^{(i)} = (c_1^{(i)}, c_2^{(i)})_{i=1, \dots, 4}$: $c^{(i)} = Qs^{(i)}_{i=1, \dots, 4}$. Тоді за допомогою прямого лінійного перетворення (direct linear transform) можна знайти проєктивне перетворення [2], що переводить точки $p^{(i)}_{i=1, \dots, 4}$ у точки $c^{(i)}_{i=1, \dots, 4}$, тобто отримаємо таку матрицю $R = (r_{ij})_{i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 3}$, що $Rp^{(i)} = c^{(i)}_{i=1, \dots, 4}$.

Для аналізу похибок запропонованого методу обчислення координат об'єкта були проведені симуляції помилок обчислення географічних координат за допомогою проєктивної функції відповідної матриці R . Земна поверхня в області видимості БпЛА була змодельована як площина $z=0$ у тривимірному просторі, а сам апарат знаходився в точці з випадковими координатами в площині $z=1000$, тобто на висоті 1000 м. Нехай маємо такі координати камери:

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ 1000 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де c_1, c_2 – випадкові величини. Припускаємо, що камера спрямована на початок координат, тобто в центрі її поля зору є точка

$$V = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

а вектор “вгору” має такий вигляд:

$$w = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

тоді вектор спрямованості камери –

$$F = \frac{v-c}{\|v-c\|} = -\frac{c}{\|c\|}, \quad (7)$$

вектор “праворуч” для камери можна обчислити як векторний добуток

$$r = \frac{F \times w}{\|F \times w\|}, \quad (8)$$

вектор “вгору” – також як векторний добуток

$$u = \frac{r \times F}{\|r \times F\|}. \quad (9)$$

Тепер матриця повороту камери становить

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ -u_1 & -u_2 & -u_3 \\ f_1 & f_2 & f_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

а вектор трансляції камери

$$t = -RC. \quad (11)$$

Припустимо, що оптичний центр камери знаходиться в центрі зображення. Тоді внутрішню матрицю камери можемо отримати наступним чином:

$$K = \begin{pmatrix} f & 0 & w/2 \\ 0 & f & h/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

де w – ширина зображення з камери в пікселях;

h – висота зображення в пікселях;

f – фокусна відстань камери.

Для тривимірних координат точки $P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ у світових координатах спочатку

переходимо до координат камери:

$$P_c = RP + t. \quad (13)$$

Далі проєкція на зображення виконується за допомогою проєктивного перетворення, що відповідає матриці K , тобто

$$p = KP_c, \quad (14)$$

де p – піксельні координати на зображенні.

Отже, ми отримуємо проєктивне перетворення H як обернене до проєкції між площиною $z = 0$ та піксельними координатами зображення, де кожна точка $w = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ переходить у відповідну їй проєкцію $p = \begin{pmatrix} p^{(1)} \\ p^{(2)} \end{pmatrix}$ в піксельних координатах на зображенні таким чином:

$$p = K \left(R \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} + t \right), \quad (15)$$

де K – внутрішня матриця камери;

t – вектор трансляції камери.

$$\text{Тобто } \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = Hp.$$

Визначимо випадкові чотири точки $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ у піксельних координатах зображення та відповідні їм проєкції в площину географічних координат $w_i = Hp_i, i = 1, \dots, 4$. Піксельні координати $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ будемо інтерпретувати як моделювання піксельних координат об'єктів на зображенні, які видно і на фотознімку з БпЛА, і на супутниковому знімку (еталонному зображенні), $w_i = (Hp_i)_{i=1,\dots,4}$ – їх точні географічні координати. Оскільки на практиці позначення відповідних точок на зображенні та їх проєкція в площину географічних координат здійснюється з похибкою, змоделюємо похибку за допомогою випадкового вектора:

$$w_i = w_i + \begin{pmatrix} \delta_{i,x} \\ \delta_{i,y} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

де $\delta_{i,x}$ та $\delta_{i,y}$ – незалежні, однаково розподілені, випадкові величини з рівномірним розподілом у відрізьку $[-1,1]$.

Тоді з урахуванням похибки на практиці ми отримаємо проєктивне перетворення, що відповідає матриці H , а саме $H p_i = \left(w_i \right)_{i=1,\dots,4}$. Для кожного пікселя p на зображенні знайдемо похибку $e(p) = \|H p - H p\|$.

Нехай S_{in} – множина пікселів усередині чотирикутника з вершинами в точках $(p_i)_{i=1,\dots,4}$, а S_{out} – множина точок, розташованих зовні того самого чотирикутника.

Позначимо середню похибку всередині та зовні чотирикутника E_{in} та E_{out} , тоді маємо

$$E_{in} = \frac{1}{|S_{in}|} \sum_{p \in S_{in}} e(p), \quad E_{out} = \frac{1}{|S_{out}|} \sum_{p \in S_{out}} e(p). \quad (17)$$

Аналогічно визначимо максимальні похибки:

$$E_{in}^{\max} = \max_{p \in S_{in}} e(p), \quad E_{out}^{\max} = \max_{p \in S_{out}} e(p), \quad (18)$$

де E_{in}^{\max} – максимальна похибка всередині чотирикутника з вершинами в точках $(p_i)_{i=1,\dots,4}$;

E_{out}^{\max} – максимальна похибка зовні цього ж чотирикутника;

$e(\cdot)$ – функція похибки.

Отже, для кожної з 10 випадково згенерованих $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ було проведено по 1000 симуляцій випадкових похибок $\delta_{i,x}$ та $\delta_{i,y}$. Для цього була використана мова програмування Python. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати симуляцій

Координати БПЛА (camera_position)	Максимальна похибка всередині чотирикутника з ключових точок	Максимальна похибка зовні чотирикутника з ключових точок	Середня похибка всередині чотирикутника з ключових точок	Середня похибка зовні чотирикутника з ключових точок
(25, -101, 1000)	1,61	3,71	0,55	0,77
(103, 6, 1000)	1,63	3,79	0,55	0,77
(-235, -441, 1000)	1,68	13,40	0,56	0,96
(-101, 486, 1000)	1,74	11,73	0,57	0,94
(-133, -387, 1000)	1,58	8,58	0,56	0,88
(213, -16, 1000)	1,71	4,96	0,57	0,82
(310, 93, 1000)	1,51	6,77	0,56	0,86
(31, -148, 1000)	1,62	4,19	0,56	0,77
(-272, 51, 1000)	1,63	6,09	0,56	0,84
(-454, 229, 1000)	1,60	17,02	0,56	1,01

У результаті симуляцій нормалізовані помилки проєкції пікселів у географічні координати були візуалізовані на рис. 3. Зокрема, сторони чотирикутника з вершинами в точках $(p_i)_{i=1,\dots,4}$ зображено білим. Розмір похибки позначено градацією сірого: від найсвітлішого (найменша похибка), далі за її зростанням – до чорного.

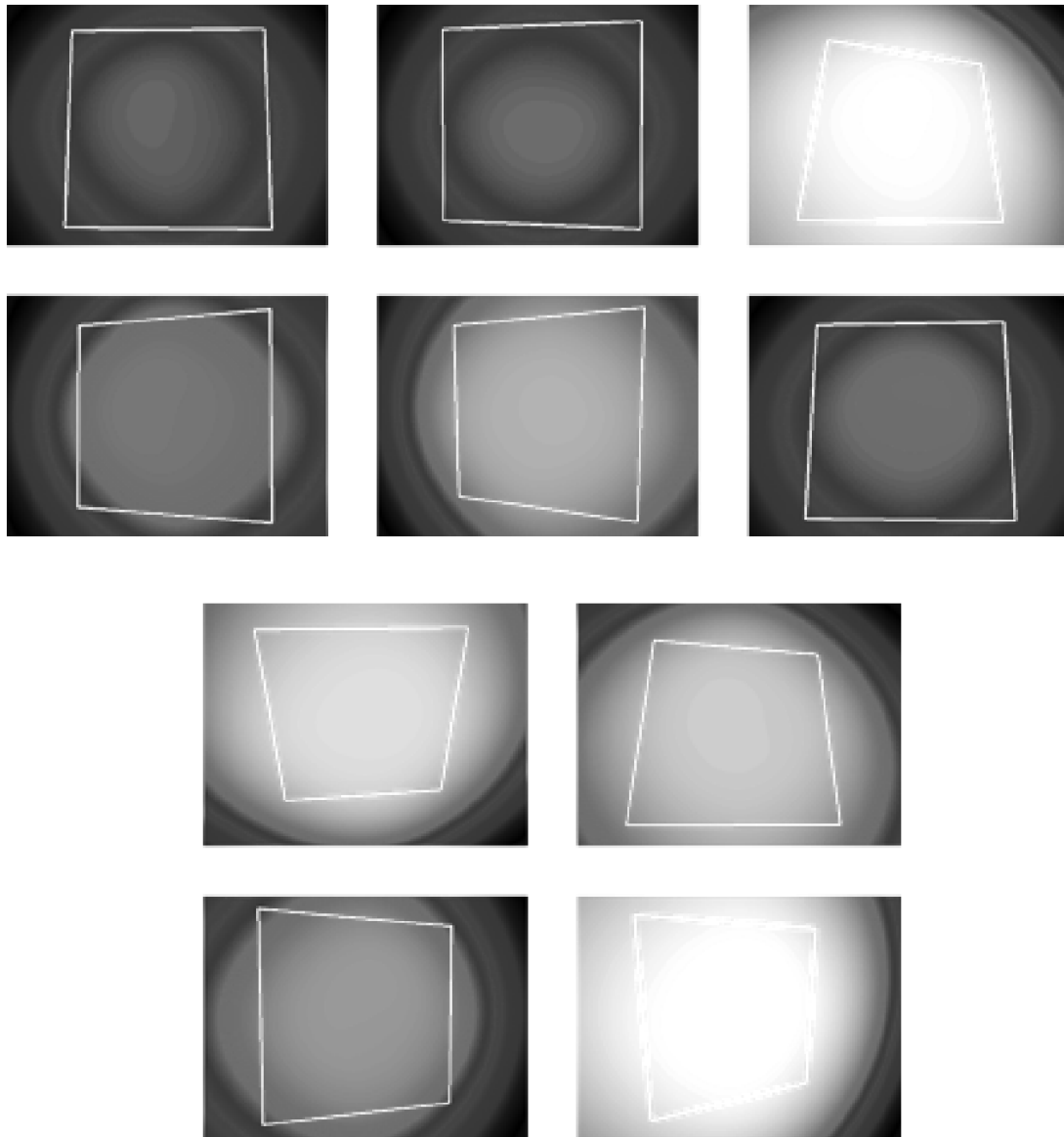


Рис. 3. Розподіл нормалізованих похибок проєкції пікселів

У результаті проведених 10 серій по 1000 симуляцій максимальна помилка всередині чотирикутника з ключових точок становила менше 2 м, а максимальна похибка зовні – близько 17 м. Середня похибка всередині чотирикутника з ключових точок була трохи більше 0,5 м, а зовні – близько 1 м. Найменші середні похибки розташовані всередині опуклої оболонки ключових точок. Зовні опуклої оболонки ключових точок похибка зростає в разі збільшення відстані до опуклої оболонки.

Після проведення симуляцій роботу вдосконаленого алгоритму було перевірено в натурних випробуваннях. Для цього було вибрано декілька ділянок місцевості

й визначено координати об'єктів, розташованих на них. Обліт цих ділянок здійснювався декількома БпЛА типу крило. Із наземної станції в режимі, наближеному до реального часу, отримувався відеопотік та оброблявся на тестовому комп'ютері, де було встановлено програмне забезпечення, що працювало на основі вдосконаленого алгоритму. Так, під час обльотів було здійснено близько 800 контрольних замірів. Максимальна похибка всередині чотирикутника становила близько 4 м, великий вплив на неї мали такі чинники: хмарність, конвекційні потоки повітря, – що спотворювали зображення на відеопотоці. За межами чотирикутника в ближній зоні похибка становила близько 8 м. Також на значній відстані за межами чотирикутника, коли вдосконалений алгоритм ще обробляв зображення, максимальна похибка була близько 28 м. Результати натурних випробувань не дуже відрізняються (корелюються) від даних, отриманих під час симуляцій.

Висновки. Переверено похибку вдосконаленого алгоритму обчислення координат точок на матеріалах повітряної розвідки з БпЛА, що перебуває над рівнинною місцевістю. Для обчислення координат оператор позначає чотири точки на МПР із БпЛА та відповідні точки на еталонному зображенні, що має прив'язку до географічних координат. Позначені ключові точки дозволяють обчислити проєктивне перетворення, що відображає піксельні координати точки на МПР із БпЛА в географічні координати цієї точки. Для високої точності обчислення координат об'єкта ключові точки необхідно вибирати навколо нього, тобто таким чином, щоб він знаходився всередині чотирикутника з вершинами в ключових точках.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Michael G. Ground Object Geo-Location Using UAV Video Camera // IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference. IEEE. 2006. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313770>
2. Autonomous Target Detection and Localization Using Cooperative Unmanned Aerial Vehicles / Yoon Y. et al. // Optimization and Cooperative Control Strategies: Proceedings of the 8th International Conference on Cooperative Control and Optimization. Springer Berlin Heidelberg, 2009. P. 195–205. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88063-9_12
3. Rick Zh., Liu H. Vision-Based Relative Altitude Estimation of Small Unmanned Aerial Vehicles in Target Localization // Proceedings of the 2011 American Control Conference. IEEE. 2011. P. 4622–4627. <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2011.5991109>
4. Метод виділення точок прив'язки на аерофотознімках, отриманих безпілотними літальними апаратами, для їх використання під час автономної навігації / Л. Б. Каневський, В. А. Пашинський, О. С. Колісник, Н. А. Бедрій // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2021. Вип. 20. С. 4–17. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.01>
5. Kim I., Kin Choong Y. Object Location Estimation from a Single Flying Camera // Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM). 9th International Conference. IARIA. 2015. P. 82–88.
6. Snehil S., Bhushan S., Sivayazi K. Detection and Location Estimation of Object in Unmanned Aerial Vehicle Using Single Camera and GPS // 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). IEEE. 2020. P. 73–78. <http://dx.doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071439>

7. Camera-Based Local and Global Target Detection, Tracking, and Localization Techniques for UAVs / Daramouskas I. & et al. // *Machines*. Vol. 11, № 2. 2023. <https://doi.org/10.3390/machines11020315>
8. Young-Hoon J., Ko K., Lee W. An Indoor Location-Based Positioning System Using Stereo Vision with the Drone Camera // *Mobile Information Systems*. 2018. P. 5160543. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/5160543>
9. Yangjun G., Li G. A GNSS Instrumentation Covert Directional Spoofing Algorithm for UAV Equipped with Tightly-Coupled GNSS/IM // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2023.3240197>
10. Zhengyou Zh. Camera Calibration. *Computer Vision: a Reference Guide* // Springer International Publishing. 2021. P. 130–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_164

Стаття надійшла до редакції 01.05.2025.

REFERENCES

1. Michael, G. (2006). Ground Object Geo-Location Using UAV Video Camera. In *IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference*. IEEE. (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313770>
2. Yoon, Y. et al. (2009). Autonomous Target Detection and Localization Using Cooperative Unmanned Aerial Vehicles. In *Optimization and Cooperative Control Strategies: Proceedings of the 8th International Conference on Cooperative Control and Optimization*. Springer Berlin Heidelberg. (pp. 195–205). https://doi.org/10.1007/978-3-540-88063-9_12
3. Rick, Zh., & Liu, H. (2011). Vision-Based Relative Altitude Estimation of Small Unmanned Aerial Vehicles in Target Localization. In *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. IEEE. (pp. 4622–4627). <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2011.5991109>
4. Kanevskyi, L. B., Pashynskyi, V. A., Kolisnyk, O. S., Bedrii, N. A. (2021). Metod vydilennia tochok pryv'iazky na aerofotoznmkakh, otrymanykh bezpilotnymy litalnymy aparatamy, dlia yikh vykorystannia pid chas avtonomnoi navihatsii [Method of Allocation of Mounting Points on Aerophotographs Obtained by Unmanned Aerial Vehicles for Use During Autonomous Navigation]. *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, 4–17. Zhytomyr: ZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.01> [in Ukrainian].
5. Kim, I., & Kin Choong, Y. (2015). Object Location Estimation from a Single Flying Camera. In *Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM)*. 9th International Conference. IARIA. (pp. 82–88).
6. Snehil, S., Bhushan, S., & Sivayazi, K. (2020). Detection and Location Estimation of Object in Unmanned Aerial Vehicle Using Single Camera and GPS. In *First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)*. IEEE. (pp. 73–78). <http://dx.doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071439>

7. Daramouskas, I. et al. (2023). Camera-Based Local and Global Target Detection, Tracking, and Localization Techniques for UAVs. *Machines*, 11, 2. <https://doi.org/10.3390/machines11020315>
8. Young-Hoon, J., Ko, K., & Lee, W. (2018). An Indoor Location-Based Positioning System Using Stereo Vision with the Drone Camera. *Mobile Information Systems*, 5160543. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/5160543>
9. Yangjun, G., & Li, G. (2023). A GNSS Instrumentation Covert Directional Spoofing Algorithm for UAV Equipped with Tightly-Coupled GNSS/IM. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1–13. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2023.3240197>
10. Zhengyou, Zh. (2021). Camera Calibration. *Computer Vision: a Reference Guide*. Springer International Publishing, 130–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_164

B. M. Zhurakivskyi, L. M. Naumchak, M. P. Romanchuk, M. V. Tantsiura

ERROR ANALYSIS OF AN IMPROVED ALGORITHM FOR CALCULATING THE COORDINATES OF OBJECTS BASED ON AERIAL RECONNAISSANCE DATA FROM AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

The calculation of geographical coordinates of objects based on aerial reconnaissance data from unmanned aerial vehicles in the face of enemy electronic warfare is an urgent task, the solution of which can increase the efficiency of the use of unmanned aerial vehicles for military missions. In particular, high-quality processing of aerial reconnaissance data obtained from unmanned aerial vehicles in the absence of signals from the GNSS global positioning system through the use of advanced algorithms and methods will help to improve the accuracy and efficiency of determining the coordinates of ground objects. The article proposes an improved algorithm that allows obtaining the coordinates of objects on flat terrain with high accuracy using aerial reconnaissance materials. To do this, the operator selects four points that are visible both on reconnaissance materials and on reference images that are georeferenced. The selected points allow to calculate the geographical coordinates of any point on the aerial reconnaissance materials. The accuracy of the coordinates will be higher for objects located inside a quadrangle with vertices at the selected points. The marked key points allow for a projective transformation that displays how the pixel coordinates of an object in an UAV image are transformed into its geographic coordinates. To ensure high accuracy of coordinate calculation, key points should be selected around the object, i.e., in such a way that it is located inside a quadrangle with vertices at the key points. As a result of the simulations, the maximum error inside the quadrangle of key points is less than 2 m, and the maximum error outside is about 17 m. The average error inside the quadrangle of key points was slightly more than 0.5 m, and outside - about 1 m. After the simulations, the improved algorithm was tested in field tests. For this purpose, several terrain areas were selected, and the coordinates of the objects located on them were determined. Several wing-type UAVs flew over these areas. The data obtained during the field tests do not differ much from those obtained during the simulations.

Keywords: *unmanned aerial vehicle complex; unmanned aerial vehicle; algorithm; computer vision; electronic warfare; projective transformation; error analysis.*

О. А. Нагорнюк

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ПЕРІОДИЧНОЇ, КОВЗНОЇ ЗА ЧАСТОТОЮ РАДІОПЕРЕШКОДИ

Багато сучасних засобів радіоподавлення ближньої дії будуються на основі керованих напругою генераторів, випромінювання яких є синусоїдальним коливанням із частотою, що змінюється періодично за лінійним законом у межах заданої смуги подавлення. Такі радіовипромінювання належать до періодичних, ковзних за частотою радіоперешкод, а їх потужність має нерівномірний розподіл у частотній області. Вказані радіоперешкоди мають два основні параметри, які визначають їх часові та частотні характеристики: ширина робочого діапазону частот і період повторення. Значення параметрів впливають на структуру енергетичного спектра перешкоди, що позначається на її ефективності, яка характеризується коефіцієнтом подавлення. У статті запропоновано методику вибору параметрів періодичної, ковзної за частотою радіоперешкоди для забезпечення мінімального значення коефіцієнта подавлення приймачів радіоканалів із заданими характеристиками. Вона дозволяє обрати параметри перешкоди для ефективного подавлення приймачів радіоканалів із фіксованою робочою частотою та розширенням спектра методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти. Показано, що для подавлення приймача радіосигналів із фіксованою робочою частотою період радіоперешкоди повинен бути не менше оберненого значення ширини смуги пропускання приймача. Для забезпечення мінімального значення коефіцієнта подавлення приймачів радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти потрібно враховувати допустимі ймовірності помилки під час прийому бітового символу та пакету даних, що дозволяє, за їх низьких значень, зменшити коефіцієнт подавлення на 6 дБ. Перевірку працездатності розробленої методики вибору параметрів періодичної, ковзної за частотою радіоперешкоди здійснено шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі MATLAB. Наведено залежності відносної кількості втрачених пакетів даних від відношення сигнал / перешкода та періоду повторення перешкоди.

Ключові слова: методика; періодична, ковзна за частотою радіоперешкода; параметр; радіоподавлення; коефіцієнт подавлення; передавач перешкод.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У теперішній час багато засобів радіоподавлення (РП) ближньої дії створюють на основі керованих напругою генераторів (sweep generator). Радіовипромінювання, що генерується такими передавачами перешкод, є синусоїдальним коливанням, частота якого змінюється періодично за лінійним законом у межах заданої смуги частот B_p (смуга подавлення) [1–3]. Відповідно до наявної класифікації [4] такий вид перешкод можна віднести до періодичних, ковзних за частотою радіоперешкод (ПКЧРП). Як показано в [5], ефективність впливу ПКЧРП на радіоканал із

заданими характеристиками залежить від його ширини та робочої частоти, а також від параметрів ПКЧРП, тому актуальним науковим і практичним завданням є розроблення методики вибору параметрів ПКЧРП для забезпечення заданих показників подавлення радіоканалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [6] наведено результати експериментальних досліджень впливу ПКЧРП із періодом від 1 мкс до 100 мкс на приймач радіосигналів LoRa із шириною амплітудно-частотного спектра (АЧС) 125 кГц та фактором розширення 7. Показано, що період ПКЧРП впливає на критичне значення відношення сигнал / перешкода (ВСП), відмінність у якому може становити більше 50 дБ для різних періодів.

У [7] запропоновано схему вимірювального стенда для визначення вразливості радіоліній LoRa до навмисних ПКЧРП та наведено результати експериментальних досліджень. Показано, що ПКЧРП має нерівномірний розподіл потужності в АЧС, який залежить від її періоду повторення. Це дозволяє зменшити її вплив на приймач шляхом зміни робочої частоти радіоканалу. Експериментально отримано графічні залежності критичних значень ВСП для різних періодів ПКЧРП у разі подавлення приймача радіоканалу LoRa із шириною смуги пропускання 125 кГц.

У [5] отримано аналітичний вираз для розрахунку розподілу потужності ПКЧРП у частотній області та показано, що її енергетичний спектр має максимуми на частотах, кратних оберненому значенню періоду перешкоди. Виведено математичні вирази для розрахунку залежностей ПКЧРП у смузі пропускання приймача і коефіцієнта подавлення від робочої частоти радіоканалу та періоду повторення перешкоди. Показано, що залежно від обраної частоти радіоканалу різниця потужності перешкоди, необхідної для його подавлення, може становити більше 50 дБ.

У [8] проаналізовано можливість створення ПКЧРП у дискретних піддіапазонах частот для підвищення ефективності РП каналів управління, телеметрії, супутникової радіонавігації безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Діапазони формування радіоперешкод та їх потужність запропоновано обирати відповідно до технічних характеристик БпЛА, радіоканали яких подавляються.

Отже, у проаналізованих публікаціях розглянуто вплив ПКЧРП на якість функціонування радіоканалу та шляхом експериментальних досліджень встановлено, що критичне значення ВСП (мінімально необхідне для подавлення приймача) залежить від періоду ПКЧРП, ширини смуги пропускання радіоканалу та робочої частоти. Однак у цих джерелах відсутні рекомендації та методики щодо вибору параметрів ПКЧРП.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення методики обґрунтованого вибору параметрів ПКЧРП для забезпечення мінімального значення коефіцієнта подавлення приймачів радіоканалів із заданими параметрами.

Виклад основного матеріалу. У [5] показано, що вплив структури та частотно-часових параметрів радіоперешкоди на дальність РП характеризується коефіцієнтом подавлення K_p , який вказує на мінімально необхідне відношення потужності перешкоди до потужності радіосигналу на вході приймача радіоелектронного засобу, що

подавляється, у частотній смузі пропускання його лінійної частини, за якого забезпечується задана якість (критерій) РП. Тобто коефіцієнт подавлення дорівнює оберненому значенню мінімального (критичного) ВСП q_{min} , за якого показник якості роботи радіоканалу не відповідає заданому: $K_p(\partial B) = -q_{min}(\partial B)$, де q_{min} – критичне ВСП.

Для цифрових систем зв'язку, ефективність функціонування яких визначається ймовірністю помилки під час прийому двійкового символу або пакету даних, критерій ефективності РП можна записати в такому вигляді:

$$P_b > P_b^{min}; P_{pk} > P_{pk}^{min}, \quad (1)$$

де P_b, P_{pk} – імовірності помилки під час прийому бітового символу та пакету даних;

P_b^{min}, P_{pk}^{min} – допустимі ймовірності помилки під час прийому бітового символу та пакету даних.

P_b^{min}, P_{pk}^{min} залежать від типу радіоканалу, що подавляється. Так, для нормального функціонування цифрових систем передачі мовних повідомлень (вокодерів) допустима помилка в разі прийому двійкового символу становить 10^{-2} , а для цифрових систем передачі даних – 10^{-6} [8, 9]. Однак, як показує практика, допустима кількість втрачених пакетів даних у радіоканалі керування БпЛА може досягати 90% ($P_{pk}^{min} = 0,9$).

Коли потужність радіоперешкоди розподілена рівномірно в частотній області, коефіцієнт подавлення не має залежності від несучої частоти, а визначається лише структурою радіосигналу та його параметрами. Оскільки АЧС ПКЧРП є нерівномірним [5, 7], то коефіцієнт K_p залежить від робочої частоти радіоканалу.

Модуль спектральної щільності ПКЧРП $S_p(f_n)$ можна розрахувати за таким виразом [5]:

$$|S_p(f_n)| = \left\{ \begin{array}{l} U_m \sqrt{\frac{\pi T_p}{2B_p}} \left| \sum_{n=0}^{N_p-1} e^{j2\pi f_n T_p} \right|, f_0 - 0,5B_p \leq f \leq f_0 + 0,5B_p; \\ 0, f_0 - 0,5B_p > f > f_0 + 0,5B_p \end{array} \right\}, \quad (2)$$

де T_p – період повторення;

B_p – ширина АЧС;

f_0 – центральна частота;

U_m – амплітуда;

N_p – кількість періодів.

Аналіз виразу (2) дозволяє зробити висновок, що АЧС ПКЧРП має низку локальних максимумів (пікових значень) на частотах $f_n = n/T_p, n = 0, 1, ..N_u - 1$, де $N_u = B_p T_p$ – кількість піків із шириною, обернено пропорційною періоду T_p та кількості періодів $\Delta f_{mp} = 2/(T_p N_p)$.

Оскільки потужність ПКЧРП має нерівномірний розподіл у частотній області, то залежно від робочої частоти приймача радіоканалу в смугу пропускання його лінійної частини B_c буде потрапляти перешкода різної потужності.

Потужність ПКЧРП у радіоканалі шириною B_c на частоті f_c , коли центральна частота перешкоди дорівнює нулю ($f_0 = 0$), можна розрахувати, просумувавши потужності складових енергетичного спектра $|S_p(f_n)|^2$ у смузі $[f_c - 0,5B_c, f_c + 0,5B_c]$:

$$P_B(f_c) = \sum_{n=n_1}^{n_2} |S_p(f_n)|^2; \quad f_{n_1} = f_c - 0,5B_c; \quad f_{n_2} = f_c + 0,5B_c, \quad (3)$$

де $P_B(f_c)$ – потужність перешкоди в каналі шириною B_c на частоті f_c .

На рис. 1 зображено розподіл потужності перешкоди $P_B(f_c)$, що надходить у канал шириною B_c від частоти f_c , та енергетичний спектр ПКЧРП S_p , амплітуда якого збільшена в K_m разів для наочного відображення закону його зміни. Залежності обчислено для значень: $B_c = 100$ кГц; $T_p = 4$ мкс.

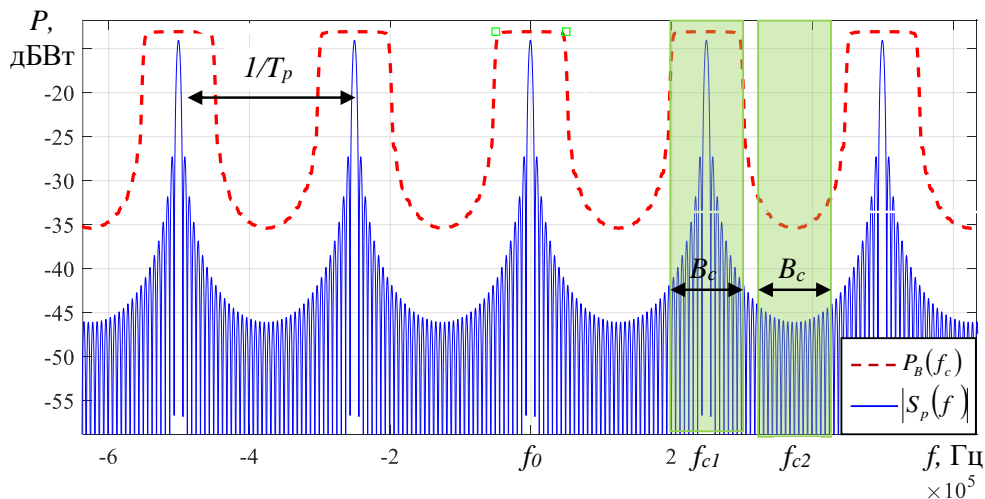


Рис. 1. Енергетичний спектр ПКЧРП та потужність перешкоди в каналі шириною B_c

Із рис. 1 видно, що потужність ПКЧРП, яка потрапляє в смугу пропускання приймача радіоканалу B_c , залежить від його робочої частоти. Тому ефективність РП приймача в різних ділянках АЧС перешкоди буде неоднаковою [7]. Оскільки коефіцієнт подавлення є оберненою величиною критичного ВСП ($K_p(\text{дБ}) = -q_{\min}(\text{дБ})$), то його значення залежатиме від робочої частоти радіоканалу та параметрів перешкоди. Для прикладу, наведеного на рис. 1, коефіцієнти подавлення в разі розміщення радіоканалу на частотах f_{c1} та f_{c2} будуть відрізнятися на 22 дБ.

Отже, необхідно розробити методику вибору таких параметрів ПКЧРП, щоб забезпечити мінімальне значення коефіцієнта подавлення радіоканалу із відомою

шириною смуги пропускання приймача B_c незалежно від місця положення його робочої частоти всередині АЧС ПКЧРП:

$$|f_0 \pm f_c| < 0,5(B_p - B_c). \quad (4)$$

У межах цієї роботи для оцінювання впливу ПКЧРП на радіоканал враховано лише її потужність, яка впливатиме на ВСП, та не взято до уваги узгодженість перешкоди зі структурою радіосигналу.

У ході розроблення методики прийнято такі припущення:

робоча частота радіоканалу може приймати будь-яке значення в межах АЧС ПКЧРП відповідно до нерівності (4);

радіосигнал передається на фіксованій частоті або має розширення спектра методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) [11].

Розрахуємо максимальне P_B^{max} , мінімальне P_B^{min} та середнє P_B^{mean} значення потужності ПКЧРП, що потрапляє в смугу пропускання приймача B_c :

$$P_B^{max} = \max(P_B(f_c)) \quad P_B^{min} = \min(P_B(f_c)); \quad P_B^{mean} = \text{mean}(P_B(f_c)) \quad (5)$$

На рис. 2 показано залежності P_B^{max} , P_B^{min} та P_B^{mean} від періоду ПКЧРП, обчислені для умов: $B_c = 100$ кГц; $B_p = 10$ МГц; $P_p = 1$ Вт. Для порівняння на рис. 2 також зображено потужність перешкоди, що потрапляє в смугу пропускання B_c , у разі її рівномірного розподілу в частотній області: $P_{hom} = P_p B_c / B_p$.

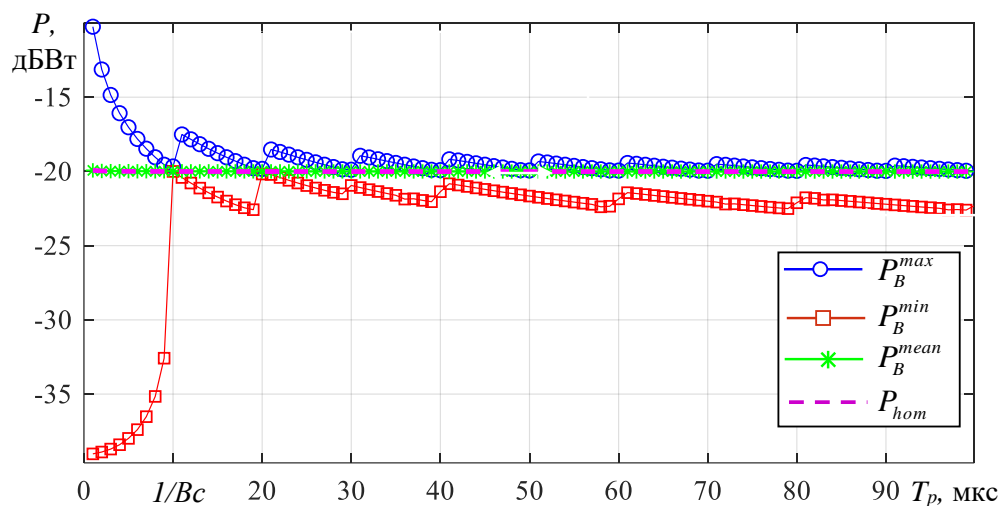


Рис. 2. Потужність перешкоди в каналі шириною B_c

Із рис. 2 видно, що різниця між максимальним і мінімальним значеннями потужності ПКЧРП у смугі B_c залежить від періоду повторення перешкоди та в разі $T_p < 1/B_c$ може становити до 30 дБ.

Для забезпечення РП приймача мінімальна потужність перешкоди на його вході P_p^{min} повинна в K_p раз перевищувати потужність радіосигналу P_c :

$$P_p^{min} = K_p P_c. \quad (6)$$

Отже, на робочих частотах радіоканалу, де $P_B(f_c) > P_{hom}$, його РП здійснюватиметься за менших значень коефіцієнта подавлення, оскільки потрібна менша потужність ПКЧРП порівняно із перешкодою з рівномірним розподілом потужності в частотній області. Відповідно, на частотах f_c , де $P_B(f_c) < P_{hom}$, значення коефіцієнта K_p буде вищим (ПКЧРП буде менш ефективною).

Якщо радіосигнал передається на фіксованій частоті, яка може приймати будь-яке значення згідно з нерівністю (4), то для забезпечення найкращого впливу ПКЧРП потрібно обрати такий період її повторення, щоб для заданих B_c забезпечити максимальне P_B^{min} .

Із рис. 2 випливає, що залежність $P_B^{min}(T_p)$ має екстремальні значення в точках, які відповідають $T_p = i/B_c$, де $i = 1, 2, 3 \dots I$. При цьому максимальне значення $P_B^{min}(T_p)$ приймає в разі $T_p = 1/B_c$.

Отже, якщо необхідно забезпечити найбільший вплив ПКЧРП на радіоканал із відомим сталим значенням B_c (створити максимальну потужність перешкоди в смузі пропускання приймача), то період перешкоди має дорівнювати $T_p = 1/B_c$.

Якщо необхідно подавити приймачі радіоканалів, ширина смуги пропускання яких знаходиться в діапазоні від B_c^{min} до B_c^{max} , то період ПКЧРП повинен бути не менше оберненого значення нижньої межі – $T_p \geq 1/B_c^{min}$.

Вибір періоду ПКЧРП відповідно до вказаних вище умов дозволить отримати найменше значення коефіцієнта подавлення незалежно від робочої частоти радіоканалу.

У ході вибору параметрів ПКЧРП для подавлення приймачів радіосигналів із ППРЧ потрібно враховувати показники критерію ефективності РП (1). Оскільки несуча частота радіосигналів із ППРЧ змінюється за псевдовипадковим законом, то ВСП у частотній смузі пропускання лінійної частини приймача для різних частотних елементів буде залежати від значення $P_B(f_c)$.

Якщо потрібно забезпечити показники P_{pk}^{min} та P_b^{min} близькими до 1, то мінімально необхідна потужність перешкоди в смузі пропускання приймача має перевищувати P_p^{min} , а період ПКЧРП вибирається, як описано вище для радіоканалу з фіксованою робочою частотою. У такому разі всі частотні елементи ППРЧ будуть гарантовано подавлені.

Якщо для порушення роботи радіолінії необхідно створити умови, за яких втрачається лише частина пакетів (частотних елементів) ($P_{pk}^{min} < 1$), то період ПКЧРП потрібно вибирати менше оберненого значення B_c . У такому разі потужність ПКЧРП у смузі B_c для деяких f_c буде більшою P_{hom} (рис. 2), що відповідатиме нижчому значенню коефіцієнта подавлення.

Відсоток частотних елементів ППРЧ, що подавляються, можна розрахувати через імовірність РП, яку обчислюють за відношенням ширини діапазону частот, де потужність перешкоди перевищує P_p^{min} , до ширини АЧС перешкоди. Оскільки розподіл потужності $P_B(f_c)$ є періодичною функцією (рис. 1), то розрахунок імовірності РП частотного елемента можна здійснювати на ділянці в один період, як показано на рис. 3.

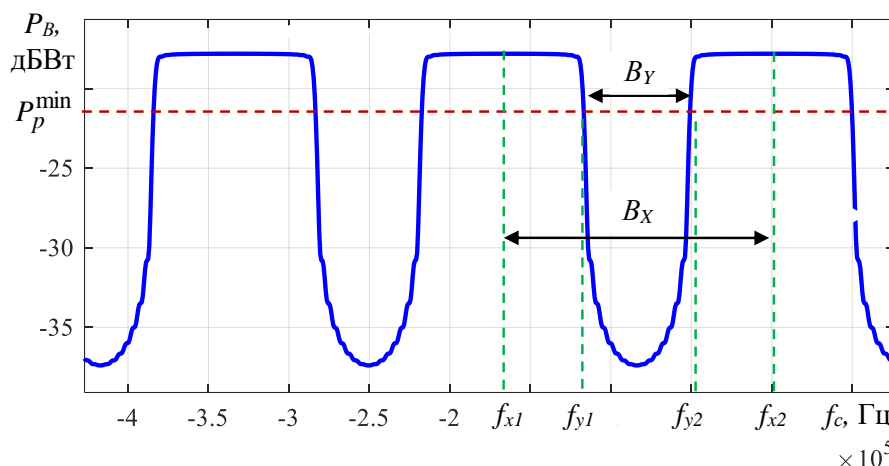


Рис. 3. Визначення ймовірності РП частотного елемента

За рис. 3 можна визначити ймовірність РП частотного елемента ППРЧ P_x як

$$P_x = \frac{B_x - B_y}{B_x}, \quad (7)$$

де $B_x = |f_{x1} - f_{x2}| = 1/T_p$;

$B_y = |f_{y1} - f_{y2}|$ – ширина діапазону частот у межах B_x , де приймач не подавляється.

Значення P_x характеризує відносну кількість частотних елементів, що подавляються. Наприклад, за $P_x = 0,2$ буде подавлено близько 20% частотних елементів.

Із рис. 3 видно, що частотний елемент ППРЧ не буде прийнятий, якщо потужність перешкоди в смузі пропускання приймача на частоті f_{ci} перевищуватиме P_p^{min} :

$$D(f_{ci}) = \begin{cases} 1, & P_B(f_{ci}) \geq P_p^{min} \\ 0, & P_B(f_{ci}) < P_p^{min} \end{cases}, \quad (8)$$

де $D(f_{ci})$ – рішення про РП на частоті f_{ci} ;

$f_{ci} = 0, \Delta f, 2\Delta f \dots 1/T_p$;

Δf – дискретність подання $S_p(f_n)$.

Враховавши (8), ймовірність РП частотного елемента можна записати як

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} D(f_{ci})}{N_s} = T_p \Delta f \sum_{i=1}^{N_s} D(f_{ci}), \quad (9)$$

де $N_s = 1/T_p \Delta f$ – розмірність масиву $D(f_{ci})$.

Для забезпечення заданого показника критерію ефективності РП потрібно обрати значення T_p , за якого $P_x = P_{pk}^{min}$. Отже, для заданого P_{pk}^{min} період T_p можна знайти з рівняння (9):

$$T_p = \frac{P_{pk}^{min}}{\Delta f \sum_{i=1}^{N_s} D(f_{ci})}. \quad (10)$$

Прийнявши до уваги наведену вище інформацію, розроблено методику вибору параметрів ПКЧРП, розглянемо її детально.

Вхідними даними для методики є значення мінімальної B_c^{min} та максимальної ширини B_c^{max} смуги пропускання приймачів, що подавляються, наявність у радіосигналі розширення спектра методом ППРЧ та показник критерію РП P_{pk}^{min} .

Методика вибору параметрів ПКЧРП складається з двох етапів:

вибір ширини АЧС перешкоди B_p ;

вибір періоду повторення перешкоди T_p .

Ширина АЧС перешкоди має перевищувати:

максимальне значення смуги пропускання B_c^{max} у разі РП приймачів радіосигналів із фіксованою робочою частотою;

максимальну ширину АЧС радіосигналів із ППРЧ B_{FHSS} за РП приймачів таких сигналів.

Оскільки ПКЧРП переважно використовується як загороджувальна за частотою радіоперешкода, то в більшості випадків ширина АЧС перешкоди значно перевищуватиме ширину смуги пропускання приймача $B_p \gg B_c$.

Для вибору періоду повторення перешкоди потрібно враховувати особливості, наведені нижче.

Якщо радіосигнал передається на фіксованій радіочастоті, то період повинен бути не менше оберненого значення нижньої межі смуги пропускання приймача $T_p \geq 1/B_c^{min}$.

Якщо радіосигнал має розширення спектра методом ППРЧ та необхідно забезпечити показник критерію ефективності РП $P_{pk}^{min} = 1$, то період перешкоди повинен бути не менше оберненого значення нижньої межі смуги пропускання приймача $T_p \geq 1/B_c^{min}$.

Якщо радіосигнал має розширення спектра методом ППРЧ, а показник критерію ефективності РП менше 1, то значення T_p визначаємо з виразу (10).

Перевірку працездатності розробленої методики вибору параметрів ПКЧРП здійснено шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі MATLAB відповідно до вимог [12]. Для цього використана програмна модель, яка включає модулі: передавача радіосигналів LoRa з ППРЧ; формувача ПКЧРП; приймача радіосигналів LoRa (некогерентне приймання [13]); формувача сигнально-перешкодової суміші; управління

параметрами радіосигналу та перешкоди; оцінювання якості роботи радіоканалу (за відносною кількістю прийнятих із помилками або втрачених пакетів даних); оброблення та узагальнення результатів.

У ході дослідження встановлювалися такі параметри радіоканалу LoRa [14]: $B_c = 125$ кГц; $SF = 9$. Для них генерувався радіосигнал LoRa з потужністю 0 дБ, здійснювалося його перенесення на частоту f_c , яка вибиралася за випадковим законом у межах $\pm 0,5(B_p - B_c)$. До радіосигналу додавалася ПКЧРП із періодом від 1 мкс до 9 мкс. Потужність перешкоди змінювалася для забезпечення ВСП у межах від -30 дБ до 0 дБ. Отримана сигнально-перешкодова суміш оброблялася програмним модулем приймача LoRa та ухвалювалося рішення про збіг прийнятого пакету даних із переданим. Відносна кількість втрачених пакетів даних (PER) рахувалася за 400 циклами моделювання для кожного значення ВСП.

Отримані в процесі моделювання залежності відносної кількості втрачених пакетів даних радіоканалу LoRa від ВСП та періоду ПКЧРП зображено на рис. 4

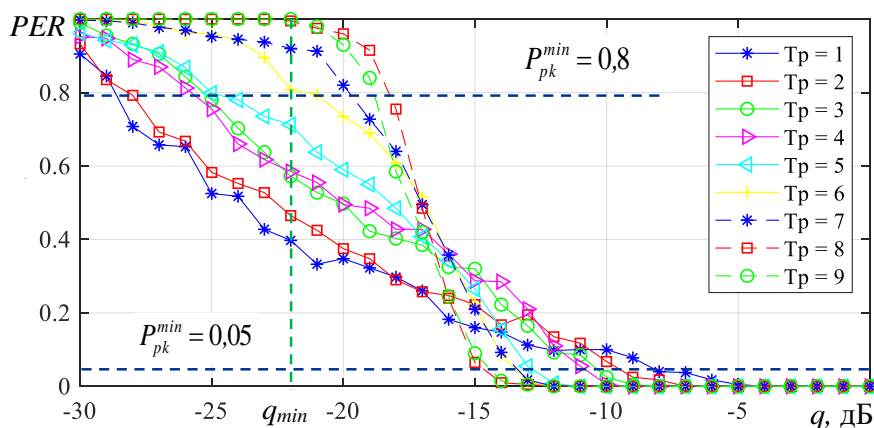


Рис. 4. Залежності відносної кількості втрачених пакетів даних радіоканалу LoRa від ВСП та періоду ПКЧРП

Із рис. 4 видно, що критичне значення ВСП для $P_{pk}^{min} = 0,05$ та $T_p < 1/B_c$ підвищується зі зменшенням періоду ПКЧРП. При цьому різниця в критичному ВСП для $T_p = 1$ мкс та $T_p = 8$ мкс близька до 6 дБ. За таких умов коефіцієнт подавлення відрізняється в 4 рази і, відповідно, дальність РП буде вдвічі більшою [5]. Критичне значення ВСП за $P_{pk}^{min} = 0,8$ для $T_p = 1$ мкс менше на 10 дБ порівняно з $T_p = 8$ мкс, що відповідає зниженню дальності РП більше ніж утричі. Отже, у разі малих значень P_{pk}^{min} для РП приймачів радіосигналів із ППРЧ доцільно використовувати ПКЧРП із періодом $T_p < 1/B_c$, а для РП усіх частотних елементів ($P_{pk}^{min} = 1$) незалежно від робочої частоти період T_p повинен бути не менше оберненого значення ширини смуги пропускання.

Теоретичну ймовірність РП частотного елемента ППРЧ, розраховану для умов комп'ютерного моделювання відповідно до виразу (10), наведено в табл. 1.

Теоретична ймовірність РП частотного елемента ППРЧ

T_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_x	0,37	0,43	0,51	0,62	0,71	0,83	0,95	1	1

Порівнявши теоретичні дані з табл. 1 із результатами, отриманими шляхом комп'ютерного моделювання (рис. 4), можна зробити висновок, що вони є близькими за значеннями. Це підтверджує працездатність розробленої методики вибору параметрів ПКЧРП.

Висновки. Енергетичний спектр ПКЧРП є нерівномірним та має локальні максимуми на частотах, кратних оберненому значенню її періоду, тому ефективність РП приймача радіоканалу залежить від розміщення його робочої частоти в межах АЧС ПКЧРП.

Для ефективного РП приймача радіосигналів із фіксованою робочою частотою період ПКЧРП повинен бути не менше оберненого значення ширини його смуги пропускання.

Для підвищення дальності РП приймачів радіосигналів із ППРЧ у ході вибору періоду ПКЧРП необхідно враховувати показник критерію РП, що дозволяє в разі його малого значення збільшити дальність РП удвічі.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на дослідження впливу ПКЧРП у разі її узгодження зі структурою радіосигналу.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування основних засобів радіоелектронної боротьби (ближньої дії) російської федерації / Г. Худов, І. Грідасов, І. Хижняк та ін. // Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. № 4. С. 209–218. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.209>
2. Zhang H., Liu X., Gulliver T. A New Electromagnetic Jamming System for Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. Canada, 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2017.8121921>
3. Ferreira R., Gaspar J., Sebastião P., Souto N. Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms // Wireless Personal Communications. 2020. № 115 (4). P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>
4. ВСТ 602.001:2024(01) Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба. Терміни та визначення. 2024. 49 с.
5. 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>
6. Methodology to Estimate the Signal-to-Interference Power Ratio for Intermittent Disturbances / A. Jose, E. Simon, A. Boé et al. // XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560235>

7. Susceptibility of LoRa Communications to Intentional Electromagnetic Interference with Different Sweep Periods / A. Jose, V. Denia, C. Gransart et al. // *Sensors*. 2022. № 22. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/s22135015>
8. Radivojević J., Pavić B., Lebl A., Petrović M. Sweep Jamming with Discrete Subbands – an Advanced Strategy for Malicious Drones Missions Prevention // *Scientific Technical Review*. 2021. Vol. 71, № 2. P. 46–52. <https://doi.org/10.5973/str2102046R>
9. Shahan P., Heide D., Cohen A. Comparison of TSVCIS Voice at 8000 and 12000 bps VERSUS CVSD at 16000 bps // *IEEE Military Communications Conference*. Orlando, 2012. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2012.6415564>
10. Basnayaka D. Introduction to Mediumband Wireless Communication // *IEEE Open Journal of the Commun. Society*. 2023. Vol. 4. P. 1247–1262. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012908>
11. Ristić V., Todorović B., Stojanović N. Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications // *Vojnotehnicki glasnik. Military Technical Courier*. 2022. Vol. 70, № 4. P. 856–876. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-38342>
12. Botev Z., Kroese D., Taimre T., Vaisman R. Data Science and Machine Learning Mathematical and Statistical Methods. 2024. 515 p. <https://doi.org/10.1201/9780367816971>
13. On the Advantage of Coherent LoRa Detection in the Presence of Interference / O. Afisiadis, S. Li, J. Tapparel, A. Burg, A. Balatsoukas-Stimming // *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8. № 14. P. 11581–11593. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3058792>
14. Bor M., Roedig U. LoRa Transmission Parameter Selection // *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. 2017. P. 27–34. <https://doi.org/10.1109/dcoss.2017.10>

Стаття надійшла до редакції 15.05.2025.

REFERENCES

1. Khudov, H., Hridasov, I., & Khyzhniak, I. et al. (2024). Analiz taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk ta taktyky zastosuvannia osnovnykh zasobiv radioelektronnoi borotby (blyzhnoi dii) rosiiskoi federatsii [Analysis of Tactical and Technical Characteristics and Tactics of Using the Main Means of Electronic Warfare (Close-Range) of the russian federation]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku [Control, Navigation and Communication Systems]*, 4, 209–218. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.209> [in Ukrainian].
2. Zhang, H., Liu, X., & Gulliver, T. (2017). A New Electromagnetic Jamming System for Unmanned Aerial Vehicles. In *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*. Canada. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2017.8121921>
3. Ferreira, R., Gaspar, J., Sebastião, P., & Souto, N. (2020). Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms. *Wireless Personal Communications*, 115 (4), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>
4. VST 602.001:2024(01) Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba. Terminy ta vyznachennia [Electromagnetic and Cyber Warfare. Radio Electronic Warfare. Terms and Definitions]. [in Ukrainian].

5. Nahorniuk, O. (2024). Doslidzhennia vplyvu periodychnoi kovznoi za chastotoiu radiopereshkody na radiokanal LoRa [Method of Automatic Parameters Estimation of Radio Signals Generated According to LoRa Standard]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia [Collection of Scientific Works of NTUU "KPI". Series Radio Engineering, Radio Equipment Manufacturing]*, 98, 30–37. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.98.30-37> [in Ukrainian].
6. Jose, A., Simon, E., & Boé, A. et al. (2021). Methodology to Estimate the Signal-to-Interference Power Ratio for Intermittent Disturbances. In *XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560235>
7. Jose, A., Denia, V., & Gransart, C. et al. (2022). Susceptibility of LoRa Communications to Intentional Electromagnetic Interference with Different Sweep Periods. *Sensors*, 22, 1–16. <https://doi.org/10.3390/s22135015>
8. Radivojević, J., Pavić, B., Lebl, A., & Petrović, M. (2021). Sweep Jamming with Discrete Subbands – an Advanced Strategy for Malicious Drones Missions Prevention. *Scientific Technical Review*, 71, 2, 46–52. <https://doi.org/10.5973/str2102046R>
9. Shahan, P., Heide, D., & Cohen, A. (2012). Comparison of TSVCS Voice at 8000 and 12000 bps VERSUS CVSD at 16000 bps. In *IEEE Military Communications Conference*. Orlando. (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2012.6415564>
10. Basnayaka, D. (2023). Introduction to Mediumband Wireless Communication. *IEEE Open Journal of the Commun. Society*, 4, 1247–1262. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012908>
11. Ristić, V., Todorović, B., & Stojanović, N. (2022). Frequency Hopping Spread Spectrum: History, Principles and Applications. *Vojnotehnicki glasnik. Military Technical Courier*, 70, 4, 856–876. <https://doi.org/10.5937/vojtehg70-38342>
12. Botev, Z., Kroese, D., Taimre, T., & Vaisman, R. (2024). *Data Science and Machine Learning Mathematical and Statistical Methods*. <https://doi.org/10.1201/9780367816971>
13. Afisiadis, O., Li, S., Tapparel, J., Burg, A., & Balatsoukas-Stimming, A. (2021). On the Advantage of Coherent LoRa Detection in the Presence of Interference. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, 14, 11581–11593. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3058792>
14. Bor, M., & Roedig, U. (2017). LoRa Transmission Parameter Selection. In *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*. (pp. 27–34). <https://doi.org/10.1109/dcoss.2017.10>

O. A. Nahorniuk

METHOD FOR SELECTION OF THE PERIODIC FREQUENCY SWEEPING RADIO INTERFERENCE PARAMETERS

Many modern short-range radio suppression means are built on voltage-controlled generators which emission is a sinusoidal oscillation with altering frequency that changes according to a linear law within a given suppression band. Such radio emissions are classified as periodic frequency sweeping radio interferences and their power has an inhomogeneous

distribution in the frequency domain. The specified radio interference has two main parameters that determine its time and frequency characteristics: the operating frequency band and the repetition period. The parameters values affect the structure of the interference energy spectrum, which influences its efficiency, that is characterized by the suppression coefficient. The method for selection of the periodic frequency sweeping radio interference parameters to ensure the minimum value of the suppression coefficient of radio channel receivers with specified characteristics is proposed in the article. The method allows to select the parameters of the interference for effective suppression of radio channel receivers with a fixed operating frequency and frequency hopping spectrum spreading. It is shown that for suppression of a fixed operating frequency radio signal receiver the interference period must be no less than the reciprocal of the receiver bandwidth. To ensure the minimum value of the suppression coefficient of radio signal receivers with frequency hopping spectrum spreading, it is necessary to take into account the acceptable error probabilities of receiving a bit symbol and a data packet, which allows, at their low values, to reduce the suppression coefficient by 6 dB. The performance of the developed method for selection of the periodic frequency sweeping radio interference parameters is verified by simulation modeling in the MATLAB software environment. The dependences of the packet error rate on the signal / interference ratio and the interference repetition period are given.

Keywords: *method; periodic frequency sweeping radio interference; parameter; radio jamming; suppression coefficient; jammer.*

І. В. Пулеко, В. О. Чумакевич, В. Б. Ревенко, Д. Є. Ступак, І. В. Свистунович

ПЛАНУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ РОЗВІДКИ МЕТОДАМИ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ ТА ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЇ ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ ЦІЛЕЙ

Досвід ведення бойових дій у російсько-українській війні переконливо свідчить про актуалізацію проблеми застосування груп безпілотних літальних апаратів для вирішення багатьох військових завдань, зокрема, планування їх ефективного застосування. У свою чергу, виконання цього завдання залежить від системи управління групою та умов застосування. Для децентралізованих систем управління принциповим моментом є необхідність автоматичного планування місії на борту безпілотних літальних апаратів. Аналіз наукових джерел показав, що більшість запропонованих алгоритмів планування не враховують особливостей ведення військової повітряної розвідки й дорозвідки, рельєфу місцевості та здебільшого орієнтовані на оптимізацію польотів за точками. Водночас для планування пошуку цілей застосовують гребінчастий, розширюваний чи вільний способи, однак вони досить незручні для автоматичного планування маршруту самим безпілотним літальним апаратом, оскільки точка на карті зазвичай не співвідноситься з висотою польоту, миттєвим полем зору бортової апаратури спостереження, масштабом та детальністю знімка. Для підвищення можливостей оптимізації автоматичного планування польоту в статті запропоновано застосовувати функцію щільності розподілу цілей. Це динамічна двовимірною математична модель, яка описує умовну відносну ймовірність знаходження цілей у різних точках простору. Вона створюється та задається на основі даних про місцевість, попередніх спостережень або інтелектуальних оцінок, що відображають розподіл можливих цілей на певній ділянці або для всієї зони розвідки. Крім того, вона дозволяє моделювати простір не як однорідний, а як область із різними ступенями важливості або ж ймовірностями знаходження цілей.

У рамках цього дослідження розглянуто варіант застосування функції щільності розподілу цілей у навчанні з підкріпленням для планування місії безпілотних літальних апаратів. Навчання з підкріпленням, як один із видів машинного навчання, полягає в навчанні інтелектуального програмного агента (безпілотного літального апарата) приймати рішення щодо послідовності виконуваних дій з урахуванням взаємодії із середовищем для досягнення максимальної винагороди. Щоб реалізувати його в задачі планування застосування безпілотних літальних апаратів в основу процесу математичного моделювання середовища покладено формування ітеративної функції щільності розподілу цілей, яка після невеликої видозміни і буде визначати функцію винагороди. Дією інтелектуального агента на середовище в цьому разі є орієнтація та переміщення його в просторі й отримання знімка підстильної поверхні. Моделювання орієнтації та переміщення безпілотних літальних апаратів у просторі проводиться за допомогою дуальних кватерніонів.

© І. В. Пулеко, В. О. Чумакевич, В. Б. Ревенко, Д. Є. Ступак, І. В. Свистунович, 2025

Ключові слова: агент; безпілотний літальний апарат; функція щільності розподілу цілей; зона розвідки; навчання з підкріпленням; Q-навчання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Досвід ведення бойових дій у російсько-українській війні переконливо свідчить про актуалізацію проблеми групового застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для вирішення багатьох військових завдань [1–2]. Особливо гостро ця проблема постає для груп малих БпЛА, які вже можуть створюватися на основі наявного парку літальних апаратів. При цьому першочерговим завданням, яке повинно бути вирішене для ефективного застосування групи є його планування, яке, у свою чергу, принципово залежить від системи управління групою та умов місії. Тому тема дослідження, що висвітлює розв’язання задачі планування застосування БпЛА розвідки з урахуванням різних умов, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день проводиться багато досліджень щодо планування застосування БпЛА, для розвідки передусім це побудова маршрутів руху. Через практичну цінність великої актуальності набувають більш складні задачі, методологія планування маршрутів для яких враховує такі специфічні вимоги та обмеження, як: вплив погодних умов на дальність польоту БпЛА, заборона руху на певних висотах чи заданими районами, визначення місцеположення та наявність зв’язку з іншими учасниками групи тощо.

У найбільш загальному вигляді підходи та класифікація методів планування розглянуті в [3–4]. Стохастичні евристичні алгоритми запропоновано в роботі [5], наведено їх характеристики, напрями вдосконалення, застосування, переваги та недоліки, однак інші види алгоритмів для формування маршрутів руху БпЛА не висвітлено. У публікації [6] алгоритми планування маршруту руху групи БпЛА поділено на п’ять різновидів: оптимізаційні; планування на основі теорії графів; евристичні; ройового інтелекту; нейронно-мережеві. У статті [7] розглянуто алгоритми ройового інтелекту з таких позицій, як: побудова алгоритмів уникнення зіткнень; розподіл завдань; планування маршруту за точками. Планування траєкторії БпЛА в умовах високої щільності перешкод описано у [8]. Планування місця розташування БпЛА на основі стратегії кругового покриття досліджено в [9]. Досить цікавий метод планування маршруту ведення повітряної розвідки динамічних об’єктів з використанням БпЛА подано в [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що велика кількість вхідних параметрів ускладнює алгоритми та методології розв’язання поставлених задач, оскільки змушує дослідників або не враховувати другорядні параметри взагалі, або ж брати їх до уваги з використанням спрощених алгоритмів. Так, більша частина запропонованих алгоритмів планування не зважає на особливості ведення військової повітряної розвідки й дорозвідки, рельєф місцевості та здебільшого орієнтована на оптимізацію польотів за точками. Водночас для планування пошуку цілей застосовують гребінчастий, розширюваний чи вільний способи, однак вони досить незручні для автоматичного планування маршруту самим БпЛА, оскільки точка на карті зазвичай не співвідноситься з висотою польоту, миттєвим полем зору бортової апаратури спостереження, масштабом та детальністю знімка. Для підвищення можливостей оптимізації автоматичного планування

польоту в [11] запропоновано застосовувати функцію щільності розподілу цілей (ФЩРЦ), тому вважаємо за доцільне розглянути її застосування для різних стратегій управління.

Формулювання завдання дослідження. Метою публікації є дослідження способів використання ФЩРЦ для планування застосування БпЛА в ході виконання розвідувальних завдань. У рамках цього дослідження обмежимося розглядом методів навчання з підкріпленням для планування місій.

ФЩРЦ – це динамічна двовимірна математична модель, яка описує умовну відносну ймовірність знаходження цілей у різних точках простору. Вона створюється та задається на основі даних про місцевість, попередніх спостережень або інтелектуальних оцінок, що відображають розподіл можливих цілей на певній ділянці або для всієї зони розвідки. ФЩРЦ дозволяє моделювати простір не як однорідний, а як область із різними ступенями важливості або ж імовірностями знаходження цілей [11].

Виклад основного матеріалу. Як зазначалося раніше, завдання планування застосування принципово залежить від системи управління групою БпЛА. Для організації таких систем доцільно використовувати деякі загальні управлінські стратегії, зокрема централізоване, децентралізоване та змішане управління. Реалізація навчання з підкріпленням можлива лише в разі децентралізованого управління, яке, у свою чергу, поділяють на колективне та зграйне [12].

Колективне управління передбачає, що в системі немає командира або централізованого пристрою управління, усі одиниці рівноцінні й кожний член групи самостійно ухвалює рішення, намагаючись зробити максимально можливий внесок у досягнення групової мети, при цьому всі члени обмінюються інформацією про обрані дії один з одним. За рахунок того, що кожний елемент вирішує завдання оптимізації лише для себе, а не намагається покращити дії всієї групи, оптимізація суттєво спрощується, тому рішення може знаходитися швидко, у реальному часі. Але це дуже ускладнює алгоритмізацію й висуває до елементів вимогу «високоінтелектуального рівня», тому що вони повинні чітко розуміти групове завдання й уміти вибирати такі дії, які приведуть до найкращого його виконання з погляду всієї групи.

У разі зграйного управління в системі також немає прямого командира або централізованого пристрою управління, усі одиниці рівноцінні й кожний член групи самостійно ухвалює рішення, намагаючись зробити максимально можливий внесок у досягнення групової мети, однак при цьому між членами групи немає обміну інформацією, тому кожен об'єкт «підлаштовує» свої дії на підставі непрямой інформації, слідкуючи за діями інших.

Дуже важливим фактором, що найбільше впливає на вибір можливої стратегії управління, є ступінь автономності БпЛА, з якою тісно пов'язані його автоматичність та інтелектуальність. Лише автономні інтелектуальні БпЛА здатні реалізовувати децентралізовані стратегії та навчання з підкріпленням.

Навчання з підкріпленням (англ. reinforcement learning – RL) – це один із видів машинного навчання, яке полягає в навчанні інтелектуального програмного агента приймати рішення щодо послідовності виконуваних дій з урахуванням взаємодії із середовищем (англ. environment) для досягнення максимальної винагороди (англ. reward) [13].

Щоб реалізувати навчання з підкріпленням у задачі планування застосування БПЛА необхідно визначити його компоненти [13]. Розглянемо їх.

Множина станів середовища (S) описує поточне відображення середовища функціонування БПЛА. Стан середовища може бути поданий як вектор $s \in S$, де S – простір усіх можливих станів.

Множина дій (A) описує конкретні дії, які БПЛА може виконати. Дія подається як $a \in A(s)$, де $A(s)$ – множина можливих дій у стані s . Множина доступних агентові дій є обмеженою (наприклад, БПЛА не може літати далі, ніж на якусь конкретну відстань).

Політика (π) – це правило (або стратегія), за яким БПЛА обирає свої дії, базуючись на поточному стані. Політика $\pi(a/s)$ визначає ймовірність вибору дії a у стані s .

Функція винагороди (R) визначає скалярну винагороду або штраф за виконання певної дії в певному стані. $R(s, a)$ описує винагороду за виконання дії a у стані s .

Правила (P), або ж функція переходу між станами, характеризує ймовірність переходу з одного стану в інший після виконання певної дії. $P(s'|s, a)$ визначає ймовірність переходу в стан s' зі стану s після виконання дії a .

Функція цінності (англ. value – V) оцінює очікувану суму майбутніх винагород, починаючи з певного стану s , слідуючи політиці π . Функція $V^\pi(s)$ визначає цінність стану за політики π .

Задача навчання з підкріпленням полягає в навчанні агента (у нашому випадку БПЛА) вибору оптимальних дій у середовищі для максимізації загальної винагороди протягом певного часу. Агент взаємодіє із середовищем (рис. 1а), яке реагує на його дії та змінює свій стан, надаючи агенту винагороду або штраф (рис. 1б) [15].

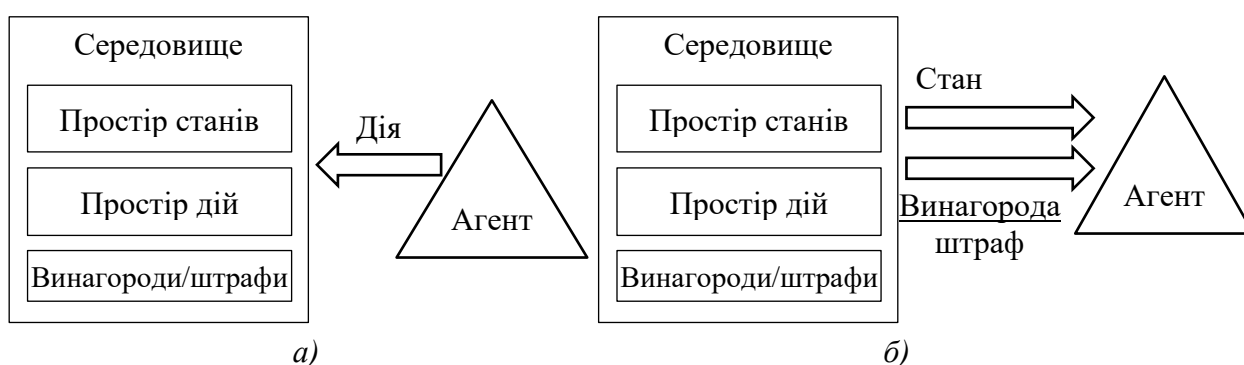


Рис. 1. Взаємодія агента та середовища [15]

При цьому для кожної політики розраховується функція цінності:

$$V^\pi(s) = \sum_{a \in A(s)} \pi(a/s) \times \sum_{s' \in S} P(s'/s, a) [R(s, a) + \gamma V^\pi(s')], \quad (1)$$

де γ – коефіцієнт дисконтування, що визначає знецінення майбутніх винагород (зазвичай від 0 до 1).

Мета агента – знайти оптимальну політику, яка максимізує очікувану суму винагород:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} \mathbf{E} \left[\sum_{t=0}^{\infty} (\gamma^t R_t / \pi) \right], \quad (2)$$

де R_t – винагорода, отримана за час t .

Для оптимізації дій агента в різних станах використовується Q -функція, що визначає очікувану суму винагород за вибір дії в кожному стані та слідування політиці після цього:

$$Q^{\pi}(s, a) = E \left[\sum_{k=0}^{\infty} (\gamma^k R_{t+k+1} / s_t = s, a_t = a, \pi) \right]. \quad (3)$$

Рівняння для оптимізації Q -функції матиме такий вигляд:

$$Q^{\pi}(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} P(s' / s, a) \max_{\pi} Q^{\pi}(s', a'), \quad (4)$$

де $P(s' | s, a)$ – імовірність переходу в стан s' після виконання дії a у стані s .

З погляду теорії навчання з підкріпленням складна модель середовища не потрібна. Наприклад, у разі застосування Q -навчання (англ. Q -learning) алгоритм не потребує моделі, його метою є навчитися стратегії, яка вказує агенту, до якої дії вдаватися та за яких обставин. Воно не вимагає моделі середовища (оскільки є безмоделним) і може розв'язувати задачі зі стохастичними переходами та винагородами, не вимагаючи складних обчислень.

Для будь-якого скінченного марковського процесу прийняття рішень (СМППР, англ. finite Markov decision process – FMDP) Q -навчання знаходить стратегію, яка є оптимальною в тому сенсі, що вона максимізує очікуване значення повної винагороди над будь-якими та усіма послідовними кроками, починаючи з поточного стану. Q -навчання може визначити оптимальну стратегію обирання дій для довільного марковського процесу за умови нескінченного часу на розвідування та частково випадкової стратегії. Символом Q позначають функцію, яка повертає винагороду, що використовують для забезпечення підкріплення, і про яку можливо сказати, що вона відповідає «якості» (англ. Quality) дії, обраної в поточному стані [13].

Однак у моделюванні розвідувальних процесів виникає певна суперечність, суть якої полягає в тому, що метою військової розвідки є виявлення, розпізнавання та ідентифікація цілей, тому функція винагороди (або відповідь середовища на дію агента) повинна залежати від кількості виявлених ворожих цілей. Водночас практична реалізація процесів виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілей на борту БпЛА досить проблематична. В ідеальних умовах, коли є повне підключення апарату до мережі Інтернет і гарно навчені моделі на основі глибоких штучних нейронних мереж (наприклад, CNN), то в принципі реалізувати виявлення та розпізнавання цілей із певною кількістю помилок цілком можливо. Але в умовах ведення бойових дій та в разі протидії засобів радіоелектронної боротьби поки що це зробити не вдається. Як правило, БпЛА проводить знімання місцевості, а процеси виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілей покладені на оператора.

Крім того, оскільки Q -навчання є ітеративним алгоритмом, то воно неявно передбачає якісь початкові умови ще до того, як відбудеться перше уточнення. Постає питання, де їх взяти. Високі початкові цінності, відомі також як «оптимістичні початкові умови» [13], можуть спонукати до дослідження (англ. *exploration*): не важливо, яку дію обрано, правило уточнення зумовить те, що вона матиме нижчі цінності, ніж інші альтернативи, підвищуючи таким чином імовірність їхнього обрання. Для скидання початкових умов доцільно застосовувати першу винагороду. Відповідно до цієї ідеї в разі першого виконання дії цю винагороду використовують для встановлення значення Q . Це робить можливим негайне навчання за фіксованих детерміністичних винагород.

Тому в основу процесу математичного моделювання середовища, у якому діють БПЛА, пропонуємо покласти формування ітеративної ФЦРЦ [11], яка за невеликої видозміни і буде визначати функцію винагороди. Формування ФЦРЦ починається з карти місцевості. Для отримання моделі в двомірному просторі виділяють мінімальні та максимальні значення по осях координат x і y для всієї області, де визначені дані. Далі встановлюємо крок дискретизації сітки Δx і Δy за кожною з координат. Зону розвідки розбиваємо на сітку з відповідним кроком дискретизації, для кожної ділянки якої обраховуємо значення функції щільності, яке вказує на ймовірність знаходження цілі (цілей) у певній точці. Вхідні дані для побудови такої функції можуть включати інформацію інших видів розвідки, супутникових знімків, історичні відомості про появу цілей у певних зонах, а також моделі поведінки противника. На другому етапі визначаємо зони найвищого інтересу. На основі ФЦРЦ окреслюємо зони з високою ймовірністю появи цілей, тобто зони інтересу. Детально процес побудови ФЦРЦ описано в [11]. У ході функціонування системи розвідки здійснюватиметься доповнення середовища на основі даних, отриманих під час функціонування БПЛА, шляхом внесення відповідних змін до ФЦРЦ.

Отже, у процесі навчання та адаптації БПЛА буде використовуватися динамічне середовище, яке безперервно оновлюється, що дозволить наближати результати моделювання до реальних умов та поліпшувати стратегії взаємодії.

Дією інтелектуального агента (БПЛА) на середовище для задачі, що розглядається, буде орієнтація і переміщення його в просторі та отримання знімка підстильної поверхні. Моделювання орієнтації та переміщення БПЛА в просторі будемо проводити за допомогою дуальних кватерніонів [14].

Орієнтацію БПЛА в просторі визначатимемо за допомогою так званих літакових кутів: рискання ψ , тангажа θ і крену γ , – які задають у базовій і зв'язній системі координат.

За базову систему координат приймемо таку: початок системи координат (точка O_0) розташований у точці початку руху БПЛА; вісь O_0X_g спрямована на північ по дотичній місцевого меридіана; вісь O_0Y_g спрямована вертикально вгору і протилежна до напрямку вектора сили тяжіння; вісь O_0Z_g доповнює систему до правої та спрямована праворуч, у бік сходу.

Зв'язна система координат стосується безпосередньо БПЛА: її початок (точка O) розташований у точці центра мас БПЛА; вісь OX спрямована вперед, до передньої точки

БпЛА; вісь OY – вертикально вгору, вона перпендикулярна горизонтальній площині об’єкта; вісь OZ доповнює систему до правої.

Тоді положення БпЛА в просторі задається радіусом-вектором початку (точка O) зв’язної системи координат відносно нерухомої базової системи координат. Орієнтація першої відносно другої визначається трьома послідовними поворотами на: кут рилкання ψ – поворот навколо осі OY , кут тангажа ϑ – поворот навколо осі OZ , кут крену γ – поворот навколо осі OX .

Для початкового визначення дуального кватерніона необхідно встановити його дійсну й уявну частини. Орієнтація і стан об’єкта задається відносно базової системи координат за допомогою кутів орієнтації ψ , ϑ , γ і вектора положення центра мас $r = (r_x, r_y, r_z)^T$.

Дійсну частину можна подати за допомогою формули

$$q_1 = \begin{bmatrix} \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \\ \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \\ \cos \frac{\psi}{2} \sin \frac{\vartheta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\vartheta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Потрібно звернути увагу, якщо послідовність поворотів інша, то вирази будуть теж іншими.

Дуальну частину визначаємо за таким виразом:

$$q_2 = \frac{1}{2} r \otimes q_1. \quad (6)$$

Обчислити кути орієнтації можна з дійсної частини дуального кватерніона q_1 :

$$\psi = \arctan \frac{2(q_0 q_2 - q_1 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}, \quad \vartheta = \arcsin(2(q_1 q_2 + q_0 q_3)), \quad \gamma = \arctan \frac{2(q_0 q_1 - q_2 q_3)}{q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2}. \quad (7)$$

А положення БпЛА обрахуємо в такий спосіб:

$$r = 2q_2 \otimes q_1^{-1}. \quad (8)$$

У результаті отримуємо вектор у кватерніонній формі $r = (0, r_x, r_y, r_z)^T$.

Задамо поворот і переміщення вектора дуальним кватерніоном. Для введених систем координат БпЛА ($O_0 X_g Y_g Z_g$ – нерухомої базової та $OXYZ$ – зв’язної) орієнтацію і його положення відносно базової системи координат можна задати дуальним кватерніоном

\tilde{q} [14]. Якщо заданий вектор r у зв'язній системі координат, то можна отримати вектор r_0 у базовій системі координат за допомогою формули

$$r_0 = \tilde{q} \otimes r \otimes \tilde{q}^{-1}, \quad (9)$$

а також у зворотному напрямку:

$$r = \tilde{q}^{-1} \otimes r_0 \otimes \tilde{q}, \quad (10)$$

де $r = (1, 0, 0, 0, 0, r_x, r_y, r_z)$ – вектор у бікватерніонній формі.

Вибір дії залежить від цілей БпЛА, його поточного стану та умов середовища (ФЩРЦ). Цей підхід дає змогу формалізувати й регулювати поведінку БпЛА в середовищі, забезпечуючи ефективне планування траєкторій руху та адаптивність до змін. Застосування дуальних кватерніонів для опису дій дозволяє точно моделювати поведінку БпЛА і робить можливим використання складних алгоритмів навчання та оптимізації.

Політика інтелектуального агента є набором правил або стратегій, які визначають дії БпЛА залежно від стану середовища та динаміки зміни ФЩРЦ. Вона дозволяє оптимізувати певні задачі, наприклад, максимізацію площі огляду або мінімізацію часу на виконання завдань. Політика може бути описана як функція π , що відображає стан середовища S через дії A , $\pi: S \rightarrow A$.

ФЩРЦ відображає стан середовища (координати місцеположення БпЛА), яке постійно змінюється та формує винагороди, що вимагає від БпЛА адаптації своєї стратегії до змін, а саме адекватної реакції на них та прогнозування змін ФЩРЦ. Тому використання навчання з підкріпленням на основі політики агента дає змогу БпЛА ефективно адаптуватися до динамічних обставин, забезпечує гнучкість та високу реактивність системи.

Практичне моделювання процесу навчання проводилося з використанням середовища OpenAI Gym [15]. Процес моделювання включав встановлення необхідних бібліотек Python.

OpenAI Gym пропонує різні ігрові середовища, які можна вбудовувати в наш код та тестувати агента. Бібліотека забезпечує API для надання всієї інформації, потрібної інтелектуальному агенту: можливі дії, розрахунок та поточний стан. Користувачу просто потрібно зосередитися на алгоритмічній частині для свого агента.

На жаль, спеціалізованого середовища для дослідження БпЛА як агента в OpenAI Gym немає. Для моделювання було використано середовище OpenAI Gym під назвою Taxi-V2 [15, 16], звідки було взято всі основні компоненти. Як дії моделювалися рухи за ФЩРЦ (північ, південь, захід, схід). За початкову винагороду бралось значення її комірки. Щоб обмежити непотрібні рухи, у такі комірки вписувалося від'ємне значення ФЩРЦ. Процес описує функція

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha \left(R(s, a) + \gamma \max_{\pi} Q(s', a') \right), \quad (11)$$

де α – це швидкість навчання ($0 < \alpha \leq 1$), тобто ступінь оновлення наших Q -значень на кожній ітерації;

γ – коефіцієнт дисконтування ($0 \leq \gamma \leq 1$), що визначає, наскільки важливими ми хочемо вважати майбутні винагороди. Високе значення коефіцієнта дисконтування (близьке до 1) відображає довгострокову ефективну винагороду, тоді як коефіцієнт дисконтування 0 змушує агента враховувати лише негайну винагороду, що робить його жадібним.

Знак (\leftarrow) означає оновлення Q -значення поточного стану та дії агента шляхом попереднього визначення ваги $(1 - \alpha)$ старого Q -значення, а потім додавання оціненого (вивченого) значення. Вивчене значення – це комбінація винагороди за виконання поточної дії в поточному стані та дисконтованої максимальної винагороди з наступного стану, у якому ми будемо після виконання поточної дії.

Власне, ми вивчаємо правильні дії в поточному стані, оцінюючи винагороду за комбінацію поточного стану / дії та максимальну винагороду для наступного. Це зрештою змусить БПЛА розглядати маршрут з найкращими винагородами разом.

Q -значення пари стан / дія – це сума миттєвої винагороди та дисконтованої майбутньої винагороди (результуючого стану). Для зберігання Q -значення для кожного стану та дії використовуємо Q -таблицю.

Отже, було реалізовано такий алгоритм процесу Q -навчання:

- 1) ініціалізувати Q -таблицю всіма нулями;
- 2) почати досліджувати дії: для кожного стану вибрати будь-яку з усіх можливих для поточного стану (S);
- 3) перехід до наступного стану (s') в результаті дії (a), отримати винагороду з ФЦРЦ;
- 4) для всіх можливих дій зі стану (s') вибрати ту, у якій найвище значення Q ;
- 5) оновити значення Q -таблиці за допомогою рівняння (11);
- 6) встановити наступний стан як поточний;
- 7) якщо досягнуто цільового стану, то завершити процес і повторити його.

Після достатньої кількості випадкового дослідження дій Q -значення мають тенденцію збігатися, слугуючи нашому агенту функцією значення дії, яку він може використовувати для вибору найоптимальнішої із заданого стану.

Є компроміс між дослідженням (вибором випадкової дії) та експлуатацією (вибором дій на основі вже вивчених Q -значень). Ми хочемо запобігти тому, щоб БПЛА завжди рухався одним і тим самим маршрутом, а міг перенавчатися, тому ввели ще один параметр ϵ , щоб врахувати це під час навчання. Замість того, щоб просто вибирати найкращу вивчену дію з Q -значенням, іноді потрібно надавати перевагу подальшому дослідженню простору дій.

Дослідження показали, що менше значення ϵ призводить до епізодів із більшою кількістю штрафів (у середньому), що очевидно, оскільки ми досліджуємо та приймаємо випадкові рішення.

Продуктивність агента значно покращилася після Q -навчання, однак, його проблема полягає в тому, що важко реалізувати велику кількість станів у середовищі за допомогою

Q -таблиці, оскільки її розмір стає занадто великим. Вже для розмірів ФЩРЦ 30×30 для отримання збіжності необхідно збільшувати кількість перерахунків епізодів приблизно до 100000. І хоча для сучасних обчислювальних засобів це нескладно, усе ж затримки під час навчання доводиться враховувати.

Крім того, у ході одночасного навчання декількох агентів (побудова маршруту для декількох БпЛА) кількість обчислень пропорційно збільшується, тому потрібно додатково формувати алгоритми взаємодії.

Висновки. Двовимірний ФЩРЦ може бути пристосований та застосований для реалізації методів навчання з підкріпленням у задачах побудови маршрутів БпЛА. Такий підхід дає змогу створити адаптивне та гнучке середовище, що відображає реальні умови, він адаптований до місцевості та забезпечує навчання й побудову маршрутів БпЛА.

Важливим моментом є здатність моделі на основі ФЩРЦ динамічно адаптуватися на основі зібраних даних, що дозволяє забезпечити актуальність і релевантність моделі середовища.

Реалізований приклад Q -навчання в цілому дозволяє здійснювати оптимізацію планування маршрутів БпЛА, але не є перспективним для планування маршрутів їх великих груп, оскільки розмір Q -таблиці стає занадто великим.

Перспективним напрямом RL є глибоке навчання з підкріпленням (англ. Deep RL) [17], що передбачає інтеграцію глибоких нейронних мереж для покращення здатності RL-моделей розпізнавати складні шаблони та адаптуватися до складних середовищ. Нейронна мережа приймає інформацію про стан та дії на вхідний шар і навчається виробляти правильні дії з часом.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Застосування безпілотних систем у Силах оборони України : Доктрина ОП 3-0(46). Київ : ЦУБС ГШ ЗСУ, 2023. 56 с.
2. Коршець О., Горбенко В. Уроки застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні // Повітряна міць України. 2023. № 1 (4). С. 9–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>
3. Чумак О. О., Дудко М. В., Дмитрієв О. М. Онтологія методів планування маршрутів руху безпілотних літальних апаратів // Випробування та сертифікація. 2024. № 1 (3). С. 69–77. <https://doi.org/10.37701/ts.03.2024.10>
4. Кучеренко О. І., Вакалюк Т. А. Класифікація методів та алгоритмів побудови маршрутів БпЛА // Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35 (74), № 3. С. 111–116. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/18>
5. Stochastic Heuristic Algorithms for Multi-UAV Cooperative Path Planning / Zhao Ch., Liu Yu., Yu L., Li W. // In Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Shanghai, China, 26–28 July 2021. P. 7677–7682. <https://doi.org/10.23919/ccc52363.2021.9549984>
6. Sun W., Hao M. A Survey of Cooperative Path Planning for Multiple UAVs // In Proceedings of the International Conference on Autonomous Unmanned Systems. Shanghai, China, 26–28 July 2021. P. 189–196. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9492-9_20

7. Tang J., Duan H., Lao S. Swarm Intelligence Algorithms for Multiple Unmanned Aerial Vehicles Collaboration : A Comprehensive Review. *Artif. Intell. Rev.* 2022. Vol. 56, 4295–4327. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10281-7>
8. Algorithm for UAV Path Planning in High Obstacle Density Environments: RFA-Star / Zhang W., Li J., Yu W. et al. // *Front. Plant Sci.* 2024. 15:1391628. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1391628>
9. UAV-BS Site Planning Based on Circular Coverage Strategy / Zhang J., Tang Z., Liu X. et al. // *Appl. Sci.* 2025. 15:1971. <https://doi.org/10.3390/app15041971>
10. Метод планування маршруту ведення повітряної розвідки динамічних об'єктів з використанням безпілотних літальних апаратів в лісостеповій місцевості / О. І. Тимочко, А. В. Тристан, О. Є. Чернавіна, А. О. Бережний // *Системи обробки інформації.* 2020. № 3 (162). С. 95–110. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.162.10>
11. Функція щільності розподілу цілей для планування застосування безпілотних літальних апаратів / І. В. Пулеко, В. О. Чумакевич, І. М. Шестак та ін. // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць.* Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (I). С. 69–82. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.06>
12. Пулеко І. В. Проблеми управління угрупованням малих безпілотних літальних апаратів з позицій теорії робототехнічних систем // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць.* Житомир : ЖВІ ДУТ, 2015. Вип. 11. С. 106–114.
13. Richard S. Sutton, Andrew G. Barto. *Reinforcement Learning : An Introduction.* 2nd ed. Cambridge, MA : The MIT Press, 2018. 526 p. ISBN 9780262039246.
14. Модель руху безпілотних літальних апаратів на основі алгебри дуальних кватерніонів / І. В. Пулеко, О. В. Андреев, О. Ф. Дубина та ін. // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць.* Житомир : ЖВІ, 2023. Вип. 23. С. 52–61. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.04>
15. Satwik Kansal, Brendan Martin. *Reinforcement Q-Learning from Scratch in Python with OpenAI Gym.* URL: <https://www.learndatasci.com/tutorials/reinforcement-q-learning-scratch-python-openai-gym/> (last accessed: 18.05.2025).
16. Q-Learning Introduction and Q Table – Reinforcement Learning w/ Python Tutorial p. 1. URL: <https://pythonprogramming.net/q-learning-reinforcement-learning-python-tutorial/> (last accessed: 18.05.2025).
17. Fan X., Li H., Chen Y., Dong D. UAV Swarm Search Path Planning Method Based on Probability of Containment // *Drones.* 2024. Vol. 8. P. 132. <https://doi.org/10.3390/drones8040132>

Стаття надійшла до редакції 19.05.2025.

REFERENCES

1. *Zastosuvannia bezpilotnykh system u Sylakh oborony Ukrainy: Doktryna OP 3-0(46) [Use of Unmanned Systems in the Defense Forces of Ukraine: Doctrine OP 3-0(46)].* (2023). Kyiv [in Ukrainian].

2. Korshets, O., Horbenko, V. (2023). Uroky zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ u rosiisko-ukrainskii viini [Lessons from the Use of Unmanned Aerial Vehicles in the russo-Ukrainian War]. *Povitriana mits Ukrainy [Air Power of Ukraine]*, 1 (4), 9–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17> [in Ukrainian].
3. Chumak, O. O., Dudko, M. V., & Dmitriiev, O. M. (2024). Ontolohiia metodiv planuvannya marshrutiv rukhu bezpilotnykh litalnykh aparativ [Ontology of Route Planning Methods for Unmanned Aerial Vehicles]. *Vyprobuvannya ta sertyfikatsiia [Testing and Certification]*, 1 (3), 69–77 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37701/ts.03.2024.10>
4. Kucherenko, O. I., Vakaliuk, T. A. (2024). Klasyfikatsiia metodiv ta alhorytmiv pobudovy marshrutiv BpLA [Classification of Methods and Algorithms for UAV Route Construction]. *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky [Scientific notes of V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical science]*, 35 (74), 3, 111–116. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/18> [in Ukrainian].
5. Zhao, Ch., Liu, Yu., Yu, L., & Li, W. (2021). Stochastic Heuristic Algorithms for Multi-UAV Cooperative Path Planning. In *Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*. Shanghai, China, July 26–28, 2021. (pp. 7677–7682). <https://doi.org/10.23919/ccc52363.2021.9549984>
6. Sun, W., & Hao, M. (2021). A Survey of Cooperative Path Planning for Multiple UAVs. In *Proceedings of the International Conference on Autonomous Unmanned Systems*. Shanghai, China, July 26–28, 2021. (pp. 189–196). https://doi.org/10.1007/978-981-16-9492-9_20
7. Tang, J., Duan, H., & Lao, S. (2022). Swarm Intelligence Algorithms for Multiple Unmanned Aerial Vehicles Collaboration : A Comprehensive Review. *Artif. Intell. Rev*, 56, 4295–4327. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10281-7>
8. Zhang, W., Li, J., & Yu, W. et al. (2024). Algorithm for UAV Path Planning in High Obstacle Density Environments: RFA-Star. *Front. Plant Sci.*, 15:1391628. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1391628>
9. Zhang, J., Tang, Z., & Liu, X. et al. (2025). UAV-BS Site Planning Based on Circular Coverage Strategy. *Appl. Sci.*, 15:1971. <https://doi.org/10.3390/app15041971>
10. Tymochko, O. I., Trystan, A. V., Chernavina, O. Ye., & Berezhnyi, A. O. (2020). Metod planuvannya marshrutu vedennia povitrianoi rozvidky dynamichnykh ob'ektiv z vykorystanniam bezpilotnykh litalnykh aparativ v lisostepovii mistsevosti [The Method of Planning the Route of Conducting Aerial Reconnaissance of Dynamic Objects Using Unmanned Aerial Vehicles in the Forest-Steppe Area]. *Systemy obrobky informatsii [Information Processing Systems]*, 3 (162), 95–110. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.162.10> [in Ukrainian].
11. Puleko, I. V., Chumakevych, V. O., & Shestak, I. M. et al. (2024). Funktsiia shchilnosti rozpodilu tsilei dlia planuvannya zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ [Target Density Function For Uav Planning]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannya, zastosuvannya 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), 69–82. Zhytomyr: ZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.06> [in Ukrainian].

12. Puleko, I. V. (2015). Problemy upravlinnia uhrupovanniam malykh bezpilotnykh litalnykh aparativ z pozytsii teorii robototekhnichnykh system [Problems of Group Control by Small Unmanned Aerial Vehicles on Theory Robotic 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]*, 11, 106–114. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].
13. Richard S. Sutton, & Andrew G. Barto. (2018). *Reinforcement Learning : An Introduction*. 2nd ed. Cambridge, MA: The MIT Press. ISBN 9780262039246.
14. Puleko, I. V., Andreiev, O. V., & Dubyna, O. F. et al. (2023). Model rukhu bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi alhebrnykh kvaternioniv [Model of Motion of Unmanned Aerial Vehicles Based on Dual Quaternion Algebra]. *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, 52–61. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.04> [in Ukrainian].
15. Satwik Kansal, & Brendan Martin. (n.d.). *Reinforcement Q-Learning from Scratch in Python with OpenAI Gym*. Retrived from <https://www.larndatasci.com/tutorials/reinforcement-q-learning-scratch-python-openai-gym/>
16. *Q-Learning Introduction and Q Table – Reinforcement Learning w/ Python Tutorial p. 1*. (n.d.). Retrived from <https://pythonprogramming.net/q-learning-reinforcement-learning-python-tutorial/>
17. Fan, X., Li, H., Chen, Y., & Dong, D. (2024). UAV Swarm Search Path Planning Method Based on Probability of Containment. *Drones*, 8, 132. <https://doi.org/10.3390/drones8040132>

I. V. Puleko, V. O. Chumakevych, V. B. Revenko, D. Y. Stupak, I. V. Svystunovich
PLANNING THE DEPLOYMENT OF RECONNAISSANCE UNMANNED AERIAL VEHICLES USING REINFORCEMENT LEARNING METHODS AND TARGET DISTRIBUTION DENSITY FUNCTION

The experience of combat operations in the Russo-Ukrainian war clearly highlights the growing relevance of employing groups of unmanned aerial vehicles (UAVs) to accomplish a wide range of military tasks. The primary problem that must be solved to ensure their effective deployment is mission planning. In turn, the planning process depends on the UAV group's control system and the operational conditions. For decentralized control systems, a critical requirement is the capability of onboard autonomous mission planning. A review of the literature indicates that most existing planning algorithms do not account for the specific features of military aerial reconnaissance and target validation, the terrain, and are mostly focused on point-to-point flight optimization. Meanwhile, typical target search planning uses comb, expandable, or free search strategies. However, these approaches are often unsuitable for autonomous route planning by the UAV itself, as coordinates on the map are typically not associated with flight altitude, the instantaneous field of view of onboard sensors, the scale, or image resolution.

To enhance the optimization capabilities of autonomous flight planning, this work proposes the use of a Target Distribution Density Function (TDDF). The TDDF is a dynamic two-dimensional mathematical model that describes the conditional relative probability of target presence at various spatial locations. It is created based on terrain data, prior observations, or intelligent assessments that reflect the distribution of potential targets within a particular area or the entire reconnaissance zone. The TDDF enables modeling the environment not as homogeneous, but as a space with varying levels of importance or likelihood of target presence.

This study explores the use of the TDDF in reinforcement learning for UAV mission planning. Reinforcement learning, a branch of machine learning, involves training an intelligent software agent (the UAV) to make decisions about the sequence of actions by interacting with the environment to maximize cumulative rewards. In the context of UAV mission planning, the environment modeling process is based on the iterative generation of the TDDF, which – with minor adjustments – serves as the reward function.

Keywords: *agent; unmanned aerial vehicle; target distribution density function; reconnaissance zone; reinforcement learning; Q-learning.*

В. В. Охрімчук, І. А. Охрімчук

МЕТОД ПОБУДОВИ ПОТЕНЦІЙНОГО ВЕКТОРА КІБЕРАТАКИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ МНОЖИН

Стрімке впровадження інформаційних технологій у ключові сфери діяльності людини та держави, зокрема в енергетику, транспорт, військову справу та економіку, спричиняє підвищення ефективності функціонування сучасного суспільства. Водночас зростає кількість та складність кіберзагроз, що зумовлює необхідність постійного вдосконалення систем інформаційної безпеки. Однак модернізація чинних систем інформаційної безпеки не гарантує належного рівня захисту через зростання складності атак та неефективне використання наявних засобів захисту. Більшість наукових досліджень зосереджені на розробці нових способів виявлення атак, тоді як питання їх запобігання залишається менш дослідженим.

У статті запропоновано метод побудови потенційного вектора кібератаки, що дозволяє оцінити ефективність чинної системи інформаційної безпеки або провести її оптимізацію шляхом перерозподілу ресурсів. Основою методу є побудова множин ресурсів системи на кожному рівні захисту та відповідних множин вразливостей, а також булевої матриці суміжності між цими множинами, подальший її аналіз для формування векторів атаки. Розглянуто два підходи до формування таких векторів: перший – через найвразливіший ресурс, другий – через найпоширенішу вразливість. Об'єднання частинних векторів на всіх рівнях дозволяє отримати повний вектор потенційної кібератаки.

Застосування методу дає змогу виявити критичні ресурси системи інформаційної безпеки, визначити універсальні або найвразливіші її елементи та запропонувати шляхи підвищення стійкості: вилучення слабких або надлишкових компонентів, усунення поширених вразливостей, посилення ключових вузлів. Метод має прикладне значення для проектування, тестування та вдосконалення систем інформаційної безпеки, а також створює підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на врахування динаміки змін у вразливостях та адаптивних стратегій зловмисників.

Ключові слова: кібербезпека; кіберзахист; кібератака; вектор кібератаки; множина; вразливість.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Стрімкий розвиток інформаційних технологій та їх інтеграція в різні сфери, наприклад, економічну, військову, енергетичну, транспортну тощо, суттєво впливає на ефективність діяльності не тільки окремо взятої людини, але й суспільства та держави в цілому. Проте, окрім усіх позитивних ефектів від їх упровадження в діяльність сучасного суспільства, суттєво й не в кращий бік змінюється ситуація з кібербезпекою. Саме тому на сучасному етапі одним із пріоритетних векторів наукових досліджень у цій сфері є розроблення інноваційних та ефективних методів

і засобів протидії кібератакам (КБА), що спрямовані на їх своєчасне детектування й нейтралізацію.

Модернізація ж чинних систем інформаційної безпеки (СІБ) не забезпечує повної гарантії захисту інформаційно-комунікаційних систем (ІКС) від різних типів КБА. Така ситуація зумовлена, з одного боку, технологічною складністю останніх, а з іншого – неефективним розподіленням засобів захисту ІКС від КБА.

Отже, пошук нових підходів до підвищення рівня кіберзахисту ІКС залишається актуальним завданням як у теоретичному, так і в прикладному вимірах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У результаті аналізу доступних джерел [1–6] встановлено, що більшість досліджень у цій сфері направлені на розроблення нових методів виявлення КБА або побудову математичних моделей для дослідження реакцій системи на неї, оцінювання заподіяної шкоди. Метою цих методів є підвищення ефективності СІБ для виявлення нетипових й аномальних КБА за рахунок розроблення нових шаблонів КБА та внесення їх до баз сигнатур СІБ, тобто основна увага спрямована на питання, яким чином виявити КБА та захиститися від неї.

З урахуванням викладеного вище постає питання про попередження потенційних КБА в ході проектування та розгортання СІБ. Вирішити цю проблему можливо за допомогою всебічного дослідження наявних засобів захисту, встановлення їх слабких місць та побудови найімовірнішого вектора КБА.

Формулювання завдання дослідження. Сьогодні для протидії КБА в ІКС розгортають СІБ. Відповідно, для досягнення своєї мети зловмиснику необхідно подолати всі механізми захисту цієї системи. У такий спосіб відбуваються постійні “змагання” між тими, хто створює СІБ, та тими, хто намагається їх подолати. Перемога перших прямо залежить від правильного вибору засобів і механізмів СІБ та розподілення їх в ІКС. Отже, знаючи слабкі сторони СІБ та ІКС в цілому, можна з високою ймовірністю визначити потенційний вектор проведення зловмисником КБА, а це, у свою чергу, може зумовити підвищення рівня кібербезпеки.

Метою статті є розроблення методу побудови потенційного вектора КБА, який може бути використаний для аналізу ефективності СІБ або перерозподілу її ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до [7] об'єктами захисту в системі є інформація, що обробляється в ній, та програмне забезпечення (ПЗ), призначене для цього. Для забезпечення захисту зазначених об'єктів у системі розробляються та впроваджуються СІБ. Як показує практика, використання багаторівневих СІБ значно посилює захист [8]. Так, наприклад, він може здійснюватися на рівнях даних, додатків (ПЗ), хоста, мережі тощо. Характерним є те, що на кожному рівні використовуються певні механізми захисту, притаманні саме йому. У цілому таку систему можна подати у вигляді моделі Деннінга (рис. 1) [9, 10].

Отже, для досягнення своєї мети зловмиснику необхідно подолати всі рівні захисту СІБ. Для цього він буде використовувати наявні вразливості як у СІБ, так і в ПЗ, тому під вектором атаки розумітимемо упорядковану множину точок докладання зусиль зловмисника для подолання механізмів захисту СІБ. Враховуючи це твердження, метод

побудови потенційного вектора КБА повинен бути направлений на визначення ймовірних точок докладання зусиль зловмисника, які, у свою чергу, формуються з множин ресурсів СІБ на кожному рівні захисту, а також відповідних множин уразливостей.

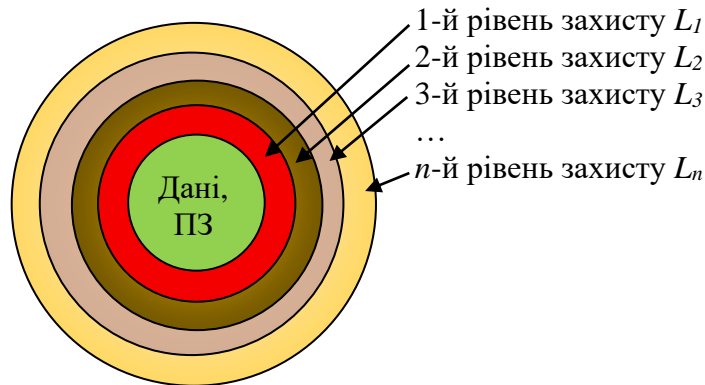


Рис. 1. Модель багаторівневого захисту (за Деннінгом)

У загальному випадку множина ресурсів СІБ L_i -го рівня може бути подана таким виразом:

$$R_{L_i} = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}\}, |R_{L_i}| = k, \quad (1)$$

де i – рівень СІБ;

k – кількість ресурсів СІБ, якими можуть бути ресурси користувача, системні ресурси, ресурси баз сигнатур, обчислювальні ресурси тощо [9]. Як відомо з [11–13] немає жодної системи, зокрема і СІБ, ресурси яких не мали б вразливостей, тому кожен ресурс r_{ik} множини R_{L_i} можна подати кортежем загального вигляду:

$$\exists r_{ik} \in R_{L_i}, r_{ik} = \langle r_{ik}, V_{ik} \rangle, \quad (2)$$

де r_{ik} – k -й ресурс;

V_{ik} – множина вразливостей цього ресурсу, причому $V_{ik} \subseteq V$ та $|V_{ik}| \geq 0$, а V – множина всіх відомих вразливостей СІБ та ІКС, тобто $V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$.

Елементами множини V можуть бути вразливості та дефекти, об'єднані в одній із найбільш відомих баз даних загальновідомих вразливостей інформаційної безпеки CVE [14]. Крім неї можуть бути використані такі бази, як *Common Weakness Enumeration (CWE)* [15], *National Vulnerabilities Database (NVD)* [16], *Vulnerability Notes Database (VND)* [17] та інші [18].

Оскільки кожний ресурс r_{ik} можна подати у вигляді (2), то множина ресурсів, які потенційно можуть бути атакованими, становитиме відношення R'_{L_i} , задане на декартовому добутку множин ресурсів R_{L_i} , та відомих вразливостей V [19]. У формалізованому вигляді воно може бути описане булевою матрицею суміжності:

$$\begin{array}{c|ccccc}
 R'_{L_i} & v_1 & v_2 & v_3 & \dots & v_s \\
 \hline
 r_{i1} & 1 & 0 & 1 & \dots & 1 \\
 r_{i2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\
 r_{i3} & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 \\
 \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 r_{ik} & 1 & 1 & 0 & \dots & 0
 \end{array} \quad (3)$$

Отже, множина R'_{L_i} містить упорядковані пари (див. (3)). Першим елементом упорядкованої пари є ресурс r_{ik} множини R_{L_i} , що має вразливість, а другим – відповідна йому вразливість $v_s \in V_{ik}$, тобто

$$R'_{L_i} \subseteq R_{L_i} \times V = \left\{ \langle r_{ik}, v_s \rangle \mid r_{ik} \in R_{L_i}, v_s \in V_{ik}, |V_{ik}| \neq 0, r_{ik} R'_{L_i} v_s \right\}. \quad (4)$$

Аналізуючи вираз (4), можна розглядати два потенційні вектори КБА для подолання механізмів захисту СІБ на L_i -му рівні.

1. *Атака через найбільш вразливий ресурс.* Зловмисник обирає для атаки той ресурс r_{ik} , для якого потужність множини його вразливостей є максимальною, тобто

$$r_{ik} = \arg \max_{r_{ik} \in R_{L_i}} |V_{ik}|. \quad (5)$$

Цей підхід логічний з погляду атакуючого, оскільки більше вразливостей означає вищу ймовірність успішного вторгнення. На думку сторони, що захищається, цей принцип дозволяє ідентифікувати найбільш вразливі елементи системи й вжити заходи для посилення захисту.

2. *Експлуатація найбільш розповсюдженої вразливості.* Інший підхід полягає у виборі тієї вразливості, яка є спільною для найбільшої кількості ресурсів, тобто

$$v_s = \arg \max_{v_s \in V} \left| \left\{ r_{ik} \in R_{L_i} : v_s \in V_{ik} \right\} \right|. \quad (6)$$

Такий підхід дозволяє зловмиснику атакувати максимальну кількість ресурсів одночасно, використовуючи одну й ту саму вразливість. Для сторони, що захищається, цей аналіз є критично важливим для виявлення точок концентрації ризику – універсальних слабких місць системи.

Оскільки точками докладання зусиль зловмисником є ресурси СІБ та ІКС, то загальний вектор атаки для L_i -го рівня СІБ можна подати у вигляді множини, елементами якої є ресурс, визначений за виразом (5), та ресурси, що входять до виразу (6).

Відповідно, для побудови повного вектора КБА слід побудувати частинні вектори для кожного рівня СІБ, він буде містити об'єднану множину ресурсів усіх рівнів, що з високою ймовірністю будуть використані для здійснення КБА.

Отже, з урахуванням наведеного математичного апарату метод побудови потенційного вектора КБА складається з таких кроків.

Крок 1. Визначення структури системи. Здійснюється аналіз СІБ та розбиття її механізмів захисту на рівні, після чого відбувається ідентифікація всіх ресурсів кожного рівня R_L (1) та їх вразливостей V_{ik} .

Крок 2. Побудова булевої матриці суміжності. За визначеними на першому кроці ресурсами та їх вразливостями будується таблиця, де рядки – ресурси, стовпці – вразливості (див. (3)).

Крок 3. Підготовка даних до аналізу на підставі (4) здійснюється в два етапи: для кожного ресурсу обчислюються потужності множин притаманних їм вразливостей, тобто $|V_{ik}|$; для кожної вразливості визначається кількість ресурсів, у яких вона присутня.

Крок 4. Вибір стратегії атаки. На основі аналізу даних, отриманих на попередньому кроці, та за виразами (5), (6) визначають дві стратегії зловмисника: перша – використання ресурсу, що має найбільшу кількість вразливостей; друга – множинний вхід, застосування однієї універсальної вразливості, що притаманної найбільшій кількості ресурсів.

Крок 5. Побудова частинного вектора КБА. У результаті обрання стратегій та об'єднання потенційних для атаки ресурсів отримуємо частинний вектор КБА для певного рівня захисту СІБ.

Далі кроки з другого по п'ятий повторюються для всіх рівнів захисту, визначених на першому кроці.

Крок 6. Побудова повного вектора КБА. Після визначення частинних векторів КБА повний вектор будується шляхом їх об'єднання.

Отже, у результаті використання запропонованого методу можна отримати множину всіх критичних ресурсів та притаманних їм вразливостей.

Ця інформація може бути використана для оптимізації СІБ, зокрема усунення недоцільних інструментів (якщо ресурс має занадто багато вразливостей і низьку критичність, то його можна виключити із системи), або ж для підсилення слабких місць (усунення вразливості, притаманної максимальній кількості ресурсів), або для створення додаткових механізмів захисту для ресурсів, що мають найбільшу кількість вразливостей.

Висновки. У статті розглянуто актуальну проблему побудови потенційного вектора КБА на ІКС. Запропонований метод базується на теорії множин і включає побудову булевої матриці суміжності між ресурсами та відомими вразливостями з використанням загальновідомих баз даних (CVE, CWE, NVD тощо). У межах методології проаналізовано два основні сценарії атак: через найуразливіший ресурс та через найбільш розповсюджену вразливість.

Результатом застосування методу є формування повного вектора КБА, що охоплює всі рівні захисту СІБ та дозволяє ідентифікувати критичні елементи системи, які можуть бути використані зловмисником. Його застосування сприяє підвищенню рівня кіберстійкості ІКС та створює підґрунтя для аналізу ефективності механізмів захисту СІБ, перерозподілу її ресурсів, усунення надмірно вразливих або неефективних компонентів і посилення захисту найбільш небезпечних точок.

Метод є універсальним, адаптивним та придатним як для етапу проєктування, так і для експлуатації ІКС. У подальших дослідженнях його можливо розширити з урахуванням динаміки розвитку вразливостей, нових типів атак та моделювання поведінки адаптивного противника в умовах змінного середовища загроз.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гришук Р. Теоретичні основи моделювання процесів нападу на інформацію методами теорій диференціальних ігор та диференціальних перетворень : монографія. Житомир : Рута, 2010. 280 с.
2. Optimising Cyber Attack Detection: A Systematic Analysis of Attack Vectors and Data Sources / Harris Daniel, Miknis Marius, Smith Connor, Wilson Ian. 2023. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30655.89767>
3. Dwivedi. Analysis of Cyber Attack Vectors // International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). 2016. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2016.7813791>
4. Погасій С. С. Моделі і методи захисту інформації в кіберфізичних системах // Безпека інформації. 2022. Т. 28, № 2. С. 67–79. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.28.16951>
5. Моделювання кібератак засобами теорії графів / В. А. Савченко, О. Й. Мацько, С. В. Легомінова та ін. // Сучасний захист інформації. 2019. № 4 (40). С. 6–11. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.040611>
6. Корченко А. О. Методи ідентифікації аномальних станів для систем виявлення вторгнень : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2019. 361 с.
7. Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах : Закон України від 05.07.1994 № 80/94-ВР (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 18.05.2025).
8. Даник Ю. Г., Гришук Р. В. Основи кібернетичної безпеки : монографія / За заг. ред. проф. Ю. Г. Даника. Житомир : ЖНАЕУ, 2016. 636 с.
9. Дудикевич В., Опірський І. Аналіз моделей захисту інформації в інформаційних мережах держави // Системи обробки інформації. 2016. № 4 (141). С. 86–89.
10. Охрімчук В. В. Узагальнена диференційно-ігрова модель шаблону потенційно небезпечної кібератаки // Кібербезпека: освіта наука і техніка. Київ : Київськ. ун-т ім. Б. Грінченка. 2020. № 4 (8). С. 113–123. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.8.113123>
11. Корченко А. Г. Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практические решения : монография. Київ : “МК-Пресс”, 2006. 320 с.
12. Охрімчук В. В. Модель шаблону потенційно небезпечної кібератаки // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні : наук.-техн. зб. 2018. № 1 (35). С. 30–37.
13. Охрімчук В. В. Метод побудови шаблонів потенційно небезпечних кібератак // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2019. Вип. 17. С. 173–182. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.17.16>
14. Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) : офіційний сайт. URL: <http://cve.mitre.org> (last accessed: 16.05.2025).

15. Common Weakness Enumeration (CWE) : офіційний сайт. URL: <https://cwe.mitre.org> (last accessed: 16.05.2025).

16. National Vulnerabilities Database (NVD) : офіційний сайт. URL: <https://nvd.nist.gov> (last accessed: 16.05.2025).

17. Vulnerability Notes Database (VND) : офіційний сайт. URL: <https://www.kb.cert.org/vuls> (last accessed: 16.05.2025).

18. Гришук Р. В., Охрімчук В. В., Ахтирцева В. С. Джерела первинних даних для розроблення шаблонів потенційно небезпечних кібератак // Захист інформації. 2016. Т. 18, № 1. С. 21–29. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.18.10109>

19. Михалін Г. О., Дюженкова Л. І. Елементи теорії множин і теорії чисел. Київ : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2003. 128 с.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2025.

REFERENCES

1. Hryshchuk, R. (2010). *Teoretychni osnovy modeliuvannia protsesiv napadu na informatsiiu metodamy teorii dyferentsialnykh ihor ta dyferentsialnykh peretvoren: monohrafiia [Theoretical Foundations of Modeling Information Attack Processes Using Differential Games and Differential Transformations. Monograph]*. Zhytomyr. [in Ukrainian].

2. Harris Daniel, Miknis Marius, Smith Connor, & Wilson Ian. (2023). *Optimising Cyber Attack Detection: A Systematic Analysis of Attack Vectors and Data Sources*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30655.89767>

3. Dwivedi. (2016). Analysis of Cyber Attack Vectors. In *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2016.7813791>

4. Pohasii, S. S. (2022). Modeli i metody zakhystu informatsii v kiberfizychnykh systemakh [Models and Methods for Information Protection in Cyber-Physical Systems]. *Bezpeka informatsii [Information Security]*, 28, 2, 67–79. <https://doi.org/10.18372/2225-5036.28.16951> [in Ukrainian].

5. Savchenko, V. A., Matsko, O. Y., & Lehominova, S. V. et al. (2019). Modeliuvannia kiberatak zasobamy teorii hrafiv [Modeling Cyber Attacks Using Graph Theory]. *Suchasnyi zakhyst informatsii [Modern Information Protection]*, 4 (40), 6–11. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.040611> [in Ukrainian].

6. Korchenko, A. O. (2019). Metody identyfikatsii anomalnykh staniv dlia system vyjavlennia vtornhen : monohrafiia [Methods for Identifying Abnormal States for Intrusion Detection Systems. Monograph]. Kyiv. [in Ukrainian].

7. *Pro zakhyst informatsii v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh: Zakon Ukrainy vid 05.07.1994 № 80/94-VR (zi zminamy) [About Information Protection in Information and Communication Systems: Law of Ukraine № 80/94- VR of 05.07.1994 (as amended)]*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text> [in Ukrainian].

8. Danyk, Yu. H., & Hryshchuk, R. V. (2016). *Osnovy kibernetichnoi bezpeky: monohrafiia [Basics of cybernetic security. Monograph]*. Zhytomyr [in Ukrainian].

9. Dudykevych, V., & Opirskiyi, I. (2016). Analiz modelei zakhystu informatsii v informatsiinykh merezhakh derzhavy [Analysis of information protection models in state

information networks]. *Systemy obrobky informatsii [Information Processing Systems]*, 4 (141), 86–89. [in Ukrainian].

10. Okhrimchuk, V. V. (2020). Uzahalnena dyferentsiino-ihrova model shablonu potentsiino nebezpechnoi kiberataky [Generalized Differential Game Model of a Potentially Dangerous Cyber Attack Pattern]. *Kiberbezpeka: osvita nauka i tekhnika [Cybersecurity: Education, Science, and Technology]*, 4 (8), 113–123. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.8.113123> [in Ukrainian].

11. Korchenko, A. H. (2006). *Postroenye system zashchyty ynformatsyy na nechetykhn mnozhestvakh. Teoryia y praktycheskye resheniya : monohrafiya [Building Information Security Systems Based on Fuzzy Sets. Theory and practical solutions: Monograph]*. Kyiv [in Ukrainian].

12. Okhrimchuk, V. V. (2018). Model shablonu potentsiino nebezpechnoi kiberataky [A Model of a Potentially Dangerous Cyber Attack Pattern]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennia systemy zakhystu informatsii v Ukraini : nauk.-tekhn. zb. [Legal, Regulatory and Metrological Support of the Information Security System in Ukraine: Scientific and Technical Collection]*, 1 (35), 30–37 [in Ukrainian].

13. Okhrimchuk, V. V. (2019). Metod pobudovy shabloniv potentsiino nebezpechnykh kiberatak [The Method of Development a Templates of Potentially Dangerous Cyber-Attacks]. *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]*, 17, 173–182. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.17.16> [in Ukrainian].

14. Common Vulnerabilities and Exposures (CVE): Official Website. (n.d.). Retrived from <http://cve.mitre.org>

15. Common Weakness Enumeration (CWE): Official Website. (n.d.). Retrived from <https://cwe.mitre.org>

16. National Vulnerabilities Database (NVD): Official Website. (n.d.). Retrived from <https://nvd.nist.gov>

17. Vulnerability Notes Database (VND): Official Website. (n.d.). Retrived from <https://www.kb.cert.org/vuls>

18. Hryshchuk, R. V., Okhrimchuk, V. V., & Akhyrtseva, V. S. (2016). Dzherela pervynnykh danykh dlia rozroblennia shabloniv potentsiino nebezpechnykh kiberatak [The Sources of Primary Data for the Development Potentially Dangerous Patterns of Cyber-Attacks]. *Zakhyst informatsii [Information Protection]*, 18, 1, 21–29. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.18.10109> [in Ukrainian].

19. Mykhalin, H. O., & Diuzhenkova, L. I. (2003). *Elementy teorii mnozhyn i teorii chysel [Elements of Set Theory and Number Theory]*. Kyiv [in Ukrainian].

V. V. Okhrimchuk, I. A. Okhrimchuk

METHOD FOR CONSTRUCTING A POTENTIAL CYBER ATTACK VECTOR USING SET THEORY

The rapid integration of information technologies into key sectors of human and state activity – including energy, transportation, defense, and the economy – enhances the efficiency

of modern society. At the same time, the number and complexity of cyber threats are increasing, necessitating the continuous improvement of information security systems. However, upgrading existing information security systems does not guarantee an adequate level of protection due to the growing sophistication of attacks and inefficient use of available security tools. Most scientific research focuses on developing new attack detection methods, while the issue of attack prevention remains relatively underexplored.

This article proposes a method for constructing a potential cyberattack vector, which enables evaluation of the effectiveness of an existing information security system or its optimization through resource redistribution. The method is based on constructing sets of system resources at each protection level, as well as the corresponding sets of vulnerabilities. A Boolean adjacency matrix is then created between these sets and analyzed to generate attack vectors. Two approaches to vector construction are considered: the first – through the most vulnerable resource, and the second – through the most widespread vulnerability. The combination of partial vectors across all levels yields a complete potential cyberattack vector.

The application of this method allows for the identification of critical information security systems resources, the determination of universal or most vulnerable system components, and the development of strategies to enhance resilience — such as removing weak or redundant components, eliminating common vulnerabilities, and strengthening key nodes. The method has practical value for the design, testing, and improvement of information security systems, and also provides a foundation for further research aimed at accounting for vulnerability dynamics and adaptive adversary strategies.

Keywords: *cybersecurity; cyberdefense; cyberattack; attack vector; set; vulnerability.*

І. А. Пількевич, І. А. Омельчук, Ю. Л. Бондаренко, К. М. Білоус

**ПОКАЗНИКИ МАНЕВРНОСТІ УДАРНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ
АПАРАТІВ ІЗ ФІКСОВАНИМ КРИЛОМ ЯК ФАКТОР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЖИВУЧОСТІ**

Сучасний розвиток інформаційних систем створює умови для розроблення новітніх засобів, що дозволяють автоматизувати та дистанціювати оператора й об'єкт управління, і тим самим більш ефективно реалізувати процеси керування. Разом зі зростанням складності автоматизованих систем й інформаційних технологій, що застосовуються, збільшується їх функціональність та з'являються нові можливості щодо використання. Інтенсивне впровадження роботизованих систем, спричинене збройною агресією, відбувається й у військовій сфері, зокрема для транспортувальних, розвідувальних та атакувальних дій. Функціонування відеопередавача на борту мобільного роботизованого комплексу дозволило забезпечити канал зворотного зв'язку з оператором, що значно покращило можливості цих систем. Вагомих здобутків в окресленому напрямі досягнуто у створенні безпілотних літальних апаратів ударного та розвідувального класів. Для них важливим є забезпечення виконання бойової задачі в умовах активної протидії противника. Саме для цього їх оснащено низкою застосунків для захисту від засобів радіоелектронної боротьби та вогневого ураження. Засоби протидії радіоелектронному впливу мають на меті убезпечити канали отримання координат та управління, а від вогневого ураження засобами протиповітряної оборони захисти апарат можливо завдяки конструктивним особливостям, які удосконалюють його маневрені характеристики. Системи озброєння протиповітряної оборони мають певні технічні можливості щодо часу реагування на повітряні цілі, зокрема їх виявлення, передавання цілевказівок, а також постріл ракети, яка в польоті проводить пошук цілі та здійснює донаведення, що теж потребує часових ресурсів. Оскільки ці можливості обумовлені тактико технічними характеристиками, то актуальним є вдосконалення маневреності БпЛА, що дозволить змінювати його положення в просторі за час, який дорівнює або є меншим, ніж потрібний на реагування системи протиповітряної оборони противника, тобто дасть йому змогу ухилитися від ураження. Можливими способами розв'язання цієї задачі є впровадження в систему керування БпЛА літакового типу вдосконалених сервоприводів електромагнітного типу, які мають меншу порівняно з наявними типами інерційність та можуть забезпечити швидко й однозначно переставлення кермових поверхонь на певний фіксований кут й утримання їх у такому положенні протягом чітко визначеного часу, а також використання елементів механізації крила. Зміна положення апарата в просторі в такому разі відбувається за рахунок відхилення кермових поверхонь на усталений кут з різним часом утримання у відхиленому положенні.

© І. А. Пількевич, І. А. Омельчук, Ю. Л. Бондаренко, К. М. Білоус, 2025

Ключові слова: роботизований комплекс; інформаційна система; бойове застосування; система автоматичної керування; керуваність.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Розвиток сучасних військових технологій створює нові реалії ведення бойових дій, та зумовлює впровадження в бойову практику застосування великої кількості дистанційно керованих систем різного призначення. Однак актуальними на сьогоднішній день є пошук способів покращення живучості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за рахунок удосконалення їх маневрених характеристик [1]. На сьогоднішній день проблема збереження літальних апаратів (ЛА) вимагає всебічного розгляду з урахуванням розвитку технічних характеристик систем протиповітряної оборони противника. До таких характеристик, зокрема, належать час реагування вогневого комплексу та виявлення цілі, імовірність її ураження, швидкість пострілу та польоту ракети (боєприпасу) тощо. Але в разі обстрілу БПЛА засобами протиповітряної оборони противника велике значення має швидкість зміни його координат в просторі та величина цих змін, тому вдосконалення конструкції БПЛА для покращення маневреності є важливим завданням для забезпечення їх живучості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання живучості є широко обговорюваним в наукових колах. Так, у [3] досліджено можливості ефективного застосування БПЛА для проведення рекогносцирування на місцевості в умовах ведення бойових дій, які ґрунтуються на заходах підготовки та безпосереднього його проведення. Опубліковані результати дослідження показали, що застосування цієї технології має великий потенціал у покращенні оперативної розвідки та для забезпечення безпеки військовослужбовців.

У матеріалах дослідження [4] розглянуто підхід до створення імітаційної моделі для оцінювання дій ударних БПЛА. У запропонованій математичній моделі промодельовані два процеси: політ апарата, який може бути описаний диференціальними рівняннями руху, та засічка цілі з подальшим ураженням його засобами. Ця модель пов'язує такі параметри, як: розміри зони бар'єру, інтенсивність виявлення цілей, кількість задіяних ударних БПЛА, характеристика їх озброєння та швидкість. Аналізуючи та змінюючи ці параметри, можна встановити потрібні закономірності між ними й застосовувати їх для розроблення раціональних стратегій використання ударних БПЛА в умовах ведення бойових дій.

Авторами статті [5] розкрито сутність концепції мережецентричного ведення бойових дій та викладено основні вимоги, що ставляться до мережецентричних систем управління військового призначення в ході їх використання в сучасних умовах для забезпечення автоматизованого управління ударними роботизованими комплексами збройних сил.

У публікації [6] запропоновано науково-методичний підхід до обрахунків параметрів стрільби, який дозволяє виявляти й розпізнавати повітряні цілі (ПЦ) типу ЛА-камікадзе та визначати ступінь їх небезпеки для розрахунку, що в підсумку мінімізує час на прийняття командиром підрозділу, який обладнаний турельними кулеметними установками, швидкого та обґрунтованого рішення щодо знищення такої цілі.

У розробленій моделі [7] проаналізовано стрільбу зенітно-ракетним комплексом (ЗРК) по різних ПЦ у ході відпрацювання цілевказівок із батареЙного командного пункту. Також запропоновано методику числового моделювання визначення показників ефективності пострілу ракетою у вигляді оцінних значень умовної ймовірності ураження ПЦ. Для побудови моделі було враховано як конструктивні, так і технічні характеристики станції та системи бойової машини (БМ) ЗРК малої дальності, а також характеристики ракети. Показано вплив різноманітних завад із різною щільністю сигналу на стрільбу ракетою. Наведено розрахунки можливого маневру цілі з урахуванням її ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) та величини перевантажень під час виконання маневру.

У [8] описано методику числового моделювання оцінювання значень умовних ймовірностей ураження ЗРК рухомих ПЦ у ході стрільби ракетами з телевізійним оптичним візором БМ. Розрахункові умовні ймовірності ураження ПЦ, що рухається в просторі, пов'язані з похилою відстанню до дальньої межі зони ураження ЗРК та залежать від параметрів середовища, у якому рухається об'єкт, і характеристик цілі. Розкрито також математичний апарат, який показує, що ефективність застосування ЗРК залежить від площі проєкції ЛА в картинній площині стрільби, умов стрільби ракетою та маневрених можливостей цілі. Для оцінювання умов стрільби ракетою та ймовірності ураження ПЦ автори ввели деякі розрахункові коефіцієнти математичної моделі, які включають її параметри: колір цілі, характеристики атмосфери, коефіцієнт якості бойової роботи особового складу, величину ЕПР рухомої цілі, рівень оптичних та радіолокаційних завад під час стрільби, швидкість ЛА й можливі допустимі його перевантаження під час маневрування.

У статті [9] описано методику оцінювання живучості системи управління вогнем зенітного підрозділу (частини), у якій зосереджено увагу на вирішенні завдання з оцінювання показника живучості системи управління вогнем. Як показник, що характеризує ступінь збереження боєздатності системи, було запропоновано використання ймовірності неураження елементів системи за час t , тобто ймовірність збереження працездатності протягом заданого часу.

Формулювання завдання дослідження. Виходячи з огляду публікацій та порушених питань, що виникають у ході аналізу чинників, які впливають на живучість БпЛА як систем озброєння, можна зробити висновки про те, що важливою складовою збереження їх функціонування є збільшення часу, протягом якого відбувається захоплення цілі та донаведення засобів протиповітряної оборони противника. Отже, триваліше перебування БпЛА в повітрі без його ураження противником забезпечить більшу ймовірність виконання поставленого завдання. Удосконалення динамічних характеристик БпЛА відіграє важливу роль у забезпеченні його живучості. Цього можна досягнути вирішенням таких завдань: збільшення швидкості польоту БпЛА шляхом покращення тягових характеристик рушіїв; зменшення інерційності виконавчих механізмів за рахунок застосування швидких поворотних систем сервоприводів; використання елементів механізації крила та модифікації способу керування його рульовими поверхнями [2].

Статтю присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі щодо підвищення рівня живучості БпЛА шляхом збільшення їх швидкості та маневреності з урахуванням чинників, які впливають на ймовірність їх ураження засобами протиповітряної оборони противника.

Виклад основного матеріалу. ЛА – це рухомий об’єкт, який підпорядковується певним математичним моделям, що описують параметри його руху. Такі моделі було проаналізовано в [4], де промодельовані два процеси: політ БПЛА та виявлення ним об’єктів ураження противника. Ця модель дозволяє описати динаміку польоту та вказує на те, що якість визначення цілей безпосередньо залежить від швидкості ЛА.

Крім того, актуальність розробки новітніх методів керування ЛА обумовлена використанням автоматизованих систем виявлення та ураження [5]. Ці системи засобів розвідки, виявлення, управління та вогневого ураження об’єктів противника, об’єднані в єдину автоматизовану систему, отримали в загальній теорії війни назву мережецентричної концепції, яка спрямована на підвищення бойових можливостей збройних формувань у сучасних війнах. Об’єднання підрозділів у єдину мережу дозволяє забезпечити взаємодію в районі проведення бойової операції сил та засобів розвідки, управління й вогневого ураження, створити єдину інформаційну систему, що підвищує ефективність ведення бойових дій військового угруповання. Безпека і живучість таких систем досягається застосуванням відповідних засобів захисту від нападу противника, зокрема систем протиповітряної оборони, захисту від технічних засобів розвідки, кібератак тощо. Мережецентрична концепція вимагає також покращення льотних характеристик ЛА, що дозволить їм виконувати бойові задачі в умовах цих автоматизованих систем. У такому разі підвищення швидкісних характеристик БПЛА відіграє важливу роль для забезпечення його живучості в умовах активної протидії противника.

Основною зброєю протидії БПЛА умовах широкомасштабної війни є пересувні БМ, обладнані швидкострільними турельними кулеметними установками в складі мобільних вогневих груп [6]. Ці вогневі підрозділи мають певну специфіку спостереження ПЦ, яке ведеться з точки O на землі (горизонтальна площина XZ на схемі (рис. 1), де вісь OX проходить крізь точку C' , яка є проєкцією точки C на земну поверхню), що дозволяє визначити напрямок руху цілі за допомогою її ракурсу q – видимого скорочення довжини фюзеляжу повітряного об’єкта.

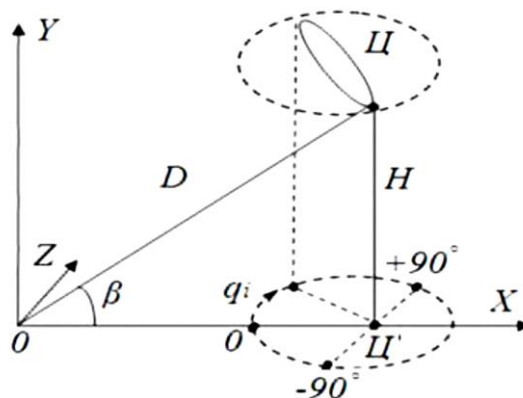


Рис. 1. Схема визначення ракурсу цілі [6]

Висота польоту цілі H визначається візуально або береться середнє значення висоти польоту розпізнаної цілі, однак це призводить до похибки та прийняття хибного рішення про ступінь її небезпеки для розрахунку БМ.

Важливе значення має час T , який є в розпорядженні розрахунку БМ для знищення цілі, що атакує. Але в разі швидкої зміни висоти ПЦ розрахунок БМ не зможе навести зброю на ціль. Оскільки кут β у разі спостереження та прицілювання буде змінюватися, то для націлювання необхідний додатковий час, що дасть змогу повітряному апарату покинути зону ураження вогневого розрахунку. Саме додатковий час на прицілювання є показником покращення живучості БпЛА під час його обстрілу з кулеметної установки.

Найбільш уразливим ЛА є в момент обстрілу його ракетою. Швидкість польоту ракети значно вища за швидкість БпЛА, тому для забезпечення неуразливості під час ракетного обстрілу є невелика кількість інструментів. Математична модель, наведена в дослідженні [7], дає можливість проаналізувати причини виникнення помилок під час пострілу ракетою та врахувати їх як фактори покращення живучості ЛА. Так, протидія ракетному комплексу у вигляді застосування радіоелектронних завад та маневрування цілі змінюють межі зони ураження в разі пострілу. Тому для числового моделювання визначення показника ефективності стрільби ракетою враховують технічні характеристики та параметри як самих ракет, так і систем БМ. Аналіз похибок наведення ракети та похибок системи підриву її бойової частини дає змогу отримати значення показника ефективності стрільби, а саме значення умовних імовірностей ураження ПЦ під час пострілу в разі стрільби однією ракетою по ЛА.

Для моделювання було прийнято такі припущення: БМ та ракети в повній бойовій готовності, техніка справна, тобто відмови відсутні під час стрільби ракетами, сигнал про постріл надходить на БМ вчасно. Аналіз ефективності стрільби ракетами в ході проведення моделювання авторами [7] здійснювався для польоту ПЦ за висотами: 500 м, 1000 м та 5000 м. Також було прийнято типові значення: швидкість руху типової цілі (ТЦ) становить 230 м/с, швидкість БпЛА – 40 м/с. Крім того, враховано те, що противник застосовує завади сильної щільності (12 дБ). У моделі було передбачено можливий маневр цілі з перевантаженнями у $\sim 4 g$ та положення про те, що ЛА мають різну ЕПР від $10^{-3} m^2$ до $10^2 m^2$.

Швидкість польоту та виконання маневру БпЛА також призводить до зростання систематичної складової динамічної похибки першого роду за рахунок маневрування ПЦ. Цю похибку $v(n_u, t)$ можна визначити за достатньо наближеним виразом за умови, що середньоквадратичне відхилення похибки першого роду в разі маневру ПЦ залишається незмінним та $v(n_u, t) \geq 0$:

$$v(n_u, t) = \left\{ 0,5n_u g \left\{ t^2 - \left[\frac{n_p}{n_u} (t - \tau_k) \right] \right\} \text{ if } t \geq \tau_k, 0,5n_u g t^2 \text{ otherwise,} \right. \quad (1)$$

де n_u – перевантаження ПЦ за одностороннього колового віражу в горизонтальній площині її польоту без зміни висоти та швидкості (змінюється в межах від 0 до 10);

t – час від початку маневру ПЦ до точки зустрічі з ракетою (змінюється в межах від 0 с до 5 с);

g – прискорення вільного падіння ($9,807 m/c^2$);

τ_k – постійна контуру управління ракетою (змінюється в межах від 0,5 с до 0,9 с, прийнято для числового моделювання $\sim 0,8$ с);

n_p – перевантаження ракети, яке вона має в траєкторії захвату цілі (змінюється в межах від 5 до 27, для моделювання прийнято 15).

За результатами проведених розрахунків отримано достатньо великі значення:

$$v(3;1) \approx 11,8 \text{ м та } v(5;1,2) \approx 23,5 \text{ м.}$$

Як видно з наведених розрахунків, значення систематичної похибки для ураження ракетою зростає в разі використання ПЦ активного маневрування, що дає змогу забезпечити живучість БПЛА, який має достатні маневрені можливості, щоб забезпечити необхідний рівень перевантажень під час виконання маневру.

Схожу математичну модель було запропоновано також у дослідженні [8], де проаналізовано ситуацію стрільби ракетою з телевізійним оптичним візором.

Одним із показників такої моделі є середнє значення систематичної складової динамічної похибки першого роду пострілу ракетою в разі стрільби по ПЦ, яка маневрує [8]. Цей показник можна розрахувати за виразом

$$m_c(n_u) = \frac{1}{t_1(n_u)} \int_0^{t_1(n_u)} v(n_u, t) dt, \quad (2)$$

де $t_1(n_u) = \frac{\tau_k}{\left(1 - \sqrt{\frac{n_u}{n_p}}\right)}$ – час, за якого величини $v(n_u, t)$ дорівнюють нулю.

За результатами математичного моделювання отримано

$$m_c(3) \approx 5,7 \text{ м, } m_c(5) \approx 12,4 \text{ м, } m_c(9) \approx 42 \text{ м.}$$

Отже, за умови, якщо радіус стійкого спрацювання радіозавод становить, наприклад 14 м, то збільшення лише однієї систематичної складової динамічної похибки на близько 12–42 м призведе до суттєвого зниження ефективності стрільби ракетою, але при цьому можливості БПЛА мають забезпечувати досягнення прискорень виконання маневру з перевантаженням до 9 g.

Як описано в моделі [9], живучість системи характеризується її можливостями зберігати або швидко відновлювати свою боєздатність в умовах застосування противником різних засобів ураження. Цю модель використовують для розрахунку ймовірності ураження системи управління вогнем зенітного підрозділу, але можна її застосувати для обрахунку ймовірності ураження БПЛА. Як показник ступеня збереження боєздатності БПЛА можна використовувати ймовірність неуразення його елементів вогнем противника за час t :

$$P(t) = (1 - P_u)^{\frac{t}{t_u}}, \quad (3)$$

де t_u – тривалість циклу розвідка-ураження засобами вогневого ураження противника;

P_u – імовірність ураження елементів системи управління за час t_u .

Як бачимо, ця модель дає аналітичну залежність між імовірністю ураження БпЛА та його характеристиками щодо швидкості руху та маневреними можливостями, оскільки на час t_u впливає швидкість зміни координат ЛА в просторі.

Час t_u за умови, що удар завдано розвідувально-ударним (розвідувально-вогневим) комплексом або артилерійським вогнем, оцінюємо таким чином: за час t_p здійснюється розвідка цілей, як правило, за допомогою радіолокаційних станцій; за час $t_{ЦВ}$ проходить передача даних цілевказівки; за час $t_{нід}$ готуються дані для ведення вогню (пуску ракет); за час t_y завдається удар (політ ракет або снарядів до цілей). У такому разі тривалість циклу розвідка-ураження для цієї моделі становить

$$t_u = t_p + t_{ЦВ} + t_{нід} + t_y, \quad (4)$$

де t_p – час розвідки цілей;

$t_{ЦВ}$ – час передавання цілевказівки;

$t_{нід}$ – час підготовки до пострілу;

t_y – час завдання удару.

Отже, імовірність ураження БпЛА є функцією в часі декількох аргументів, тому, якщо якась зі складових часу t_u збільшується, то значення результату функції буде зменшуватися. Відповідно, якщо маневрування БпЛА дозволить збільшити час t_u , то ймовірність його ураження буде зменшуватися, що є критерієм покращення живучості. На графіку (рис. 2) показано залежності ймовірності неуразення цілі від часу за різної тривалості циклу розвідка-ураження t_u . Для демонстрації математичної моделі обрахунку ймовірності неуразення (9) було обчислено значення $P(t)$ для різних значеннях тривалості циклу t_u . Для демонстрації функції прийнято ймовірність ураження $P_u = 0,95$ та тривалість t_u , яка становить 2 с, 5 с та 10 с відповідно.

Як видно з графіків, значення функції $P(t)$ залежить від часу t_u , чим триваліший цей цикл, тим більшою є ймовірність неуразення цілі на одних і тих самих відрізках часу. Так, за тривалості $t_u = 2$ с на четвертій хвилині ймовірність неуразення становить 0,01, тоді як за умови збільшення t_u до 10 с цей показник становить уже 0,398 на тій самій часовій позначці. Отже, результати обрахунків вказують на збільшення ймовірності неуразення БпЛА та, відповідно, на покращення показника живучості в разі збільшення циклу t_u за рахунок маневрених можливостей ЛА та його швидкості.

Саме тому створення ЛА, що мають характеристики щодо маневрування достатні для отримання значних переважань у польоті, є актуальним завданням сьогодення, яке потребує подальшого вивчення.

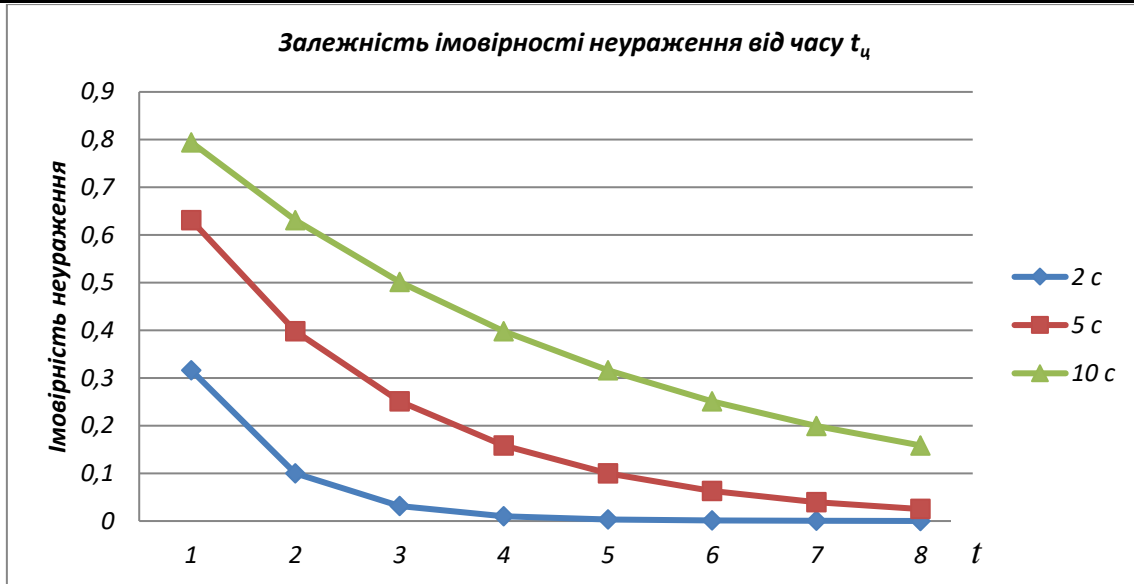


Рис. 2. Графік залежності функції (3) від часу t_u

У польоті ЛА може виконати маневр як за напрямком, так і за висотою. Але в умовах дистанційного керування зміна напрямку призводить до відхилення від курсу, що спричиняє втрати часу через відновлення орієнтування пілота на місцевості в умовах обмеженого кута огляду камери БпЛА. Тому для виконання завдання оператором більш оптимальним є зміна висоти під час польоту, що також є маневром ухиляння з переважанням.

Покращення маневрених характеристик ЛА може бути досягнуто різними способами, зокрема за рахунок використання швидкісних електромагнітних систем сервоприводів у конструкції літака, застосування рушіїв, які розвивають більшу тягу, а також способом керування відхиленням кермових поверхонь. Крім того, важливим є також вибір кермових поверхонь, які використовують для управління положенням літака в просторі. Це можуть бути як класичні стабілізатори й елерони, так і елементи механізації крила (рис. 3).

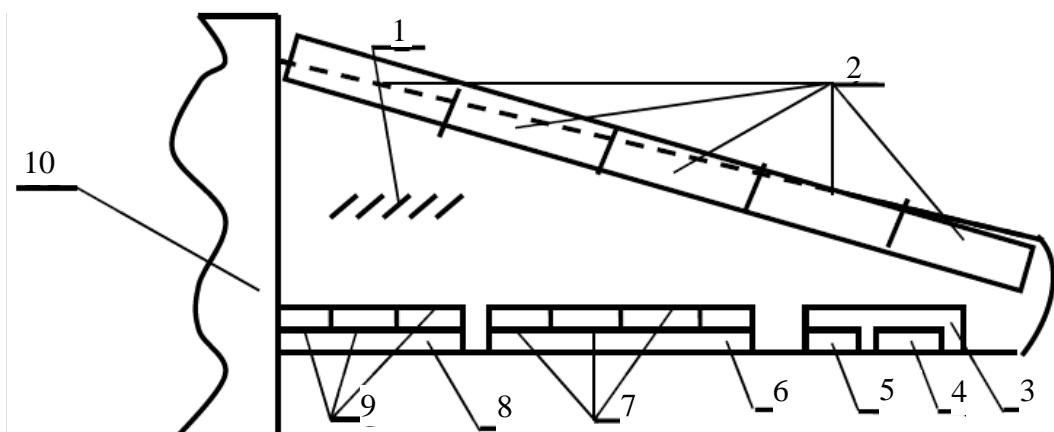


Рис. 3. Елементи механізації крила літака [10]:

1 – турбулізатори; 2 – передкрилок; 3 – елерон; 4 – тример елерона; 5 – сервокомпенсатор елерона; 6 – зовнішній закрилок; 7 – інтерцептори; 8 – внутрішній закрилок; 9 – гальмівні щитки; 10 – фюзеляж

У процесі виконання різних маневрів літака, особливо під час злету та посадки, виникає необхідність керувати лобовим опором та підйомною силою його крила за допомогою передкрилків, наявність яких дозволяє суттєво оптимізувати режими злету та посадки. Якщо кут атаки передкрилка збільшувати, то лобовий опір знижується. Підйомна сила передньої частини передкрилка стає негативною порівняно з більшою величиною підйомної сили центральної частини крила. Аналогічний ефект зменшення лобового опору та збільшення підйомної сили крила літака можна реалізувати більш простим способом, ніж із використанням передкрилків, а саме шляхом застосування щитків Крюгера й носика крила, що відхиляється (рис. 4а та 4б відповідно).

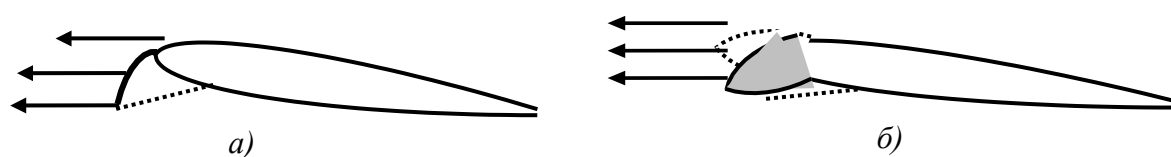


Рис. 4. Елементи механізації крила літака: а) щитки Крюгера; б) носик крила, що відхиляється [10]

Використання носика крила, що відхиляється, у поєднанні з елеронами та кермовими поверхнями стабілізаторів дозволить виконати більш різкі та швидкі маневри ЛА за умови використання автоматичної системи управління. Отже, посилення динаміки та жорсткості управління органами керування ЛА для покращення його маневрених характеристик дасть змогу підвищити живучість апарата, дозволить залишитися неураженим протягом більшого часу та виконати бойову задачу в умовах протидії противника. Методом збільшення динаміки є використання менш інерційних систем сервоприводу кермових поверхонь та способу керування їх відхиленням, який має бути передбачуваним та доступним для програмування на обчислювальній платформі з обмеженими можливостями.

Висновки

1. Дослідження математичних моделей ефективності ураження ПЦ під час стрільб ракетою підтверджує те, що активне маневрування БпЛА дає змогу забезпечити його живучість.
2. Для забезпечення прискореного виконання маневру БпЛА запропоновано використання електромагнітних систем сервоприводу та елементів механізації крила з метою отримання характеристик, які дозволять його виконувати з перевантаженням до 9 g.
3. Покращення маневрених характеристик БпЛА дозволить йому ухилитися, що дасть змогу збільшити час на прицілювання та донаведення, а отже, підвищить показник живучості.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Пількевич І. А., Омельчук І. А. Спосіб підвищення динамічних властивостей кермових приводів ударних безпілотних літальних апаратів // Тези доповідей X Міжнар. наук.-техн.

конф. («Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброєння Збройних Сил України в умовах воєнного стану», м. Київ 04–05 грудня 2024 р.). Київ : ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2024. С. 196–197.

2. Пількевич І. А., Омельчук І. А. Система сервоприводів безпілотних літальних апаратів з фіксованим крилом // Збірник тез доп. Міжнар. наук.-практ. семінару («Проблематика, тенденції і перспективи розвитку воєнної науки та освіти в умовах сучасних глобальних викликів та конфліктів», м. Київ, 28–29 листопада 2024 р.). Київ : ЦНДІ ЗС України, 2024. С. 105–106.

3. Порядок застосування безпілотних літальних апаратів для проведення рекогносцировки на місцевості в умовах війни / О. О. Болюбаш, А. О. Пономарьов, В. В. Шулежко, А. В. Шулежко // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024. № 1 (19). С. 7–13. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.01>

4. Алгоритм імітаційної моделі оцінки дій ударних безпілотних літальних апаратів / С. М. Звиглянич, С. В. Орлов, Я. М. Кожушко, М. Ф. Линник // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024. № 1 (19). С. 50–55. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.06>

5. Розвідувально-ударні системи в мережецентричній війні / Д. А. Іванов, Р. М. Олійник, Ю. М. Живець, В. А. Іванова // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024. № 1 (19). С. 56–61. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.07>

6. Науково-методичний підхід до визначення ступеня небезпеки повітряної цілі розрахунком бойової машини з турельною кулеметною установкою / В. Р. Баган, В. В. Костюк, О. М. Купріненко, О. В. Жирна // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024. № 3 (21). С. 14–22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.02>

7. Методика числового моделювання визначення показника ефективності стрільби ракетою по різних повітряних цілях при відпрацюванні цілевказівки з батареїного командного пункту / В. Є. Кудряшов, О. В. Коломійцев, О. М. Рисований та ін. // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024. № 1 (19). С. 107–116. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.13>

8. Методика числового моделювання визначення значень умовних ймовірностей ураження повітряних цілей при стрільбі ракетою з телевізійним оптичним визиром бойової машини / В. Є. Кудряшов, О. В. Коломійцев, О. В. Кулешов та ін. // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024. № 1 (19). С. 57–69. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.07>

9. Методика оцінювання живучості системи управління вогнем зенітного підрозділу (частини) / В. В. Мегельбей, С. О. Кравченко, Д. С. Іценко та ін. // Зб. наук. праць ДНДІ ВС ОБТ. 2020. № 3. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.3.2020.10>

10. Куць Н. Г. Аеродинаміка механізованого крила літака // Грааль науки : Міжнар. наук. журн. 2022. № 23. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.12.2022.44>

Стаття надійшла до редакції 01.06.2025.

REFERENCES

1. Pilkevych, I. A., & Omelchuk, I. A. (2024). Sposib pidvyshchennia dynamichnykh vlastyvostei kermovykh pryvodiv udarnykh bezpilotnykh litalnykh apparativ [A Method of

Increasing the Dynamic Properties of Steering Drives of Strike Unmanned Aerial Vehicles]. In *Tezy dopovidei Kh Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. («Aktualni problemy viiskovo-tekhnichnoi polityky ta napriamy ozbroiennia Zbroinykh Syl Ukrainy v umovakh voiennoho stanu»)* [Abstracts of the X International Scientific and Technical Conference ("Current Problems of Military-Technical Policy and Directions of Armament of the Armed Forces of Ukraine under Martial Law")]. Kyiv, December 4–5, 2024. (pp. 196–197) [in Ukrainian].

2. Pilkevych, I. A., & Omelchuk, I. A. (2024). Systema servopryvodiv bezpilotnykh litalnykh aparativ z fiksovanym krylom [Servo Drive System of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles]. In *Zbirnyk tez dop. Mizhnar. nauk.-prakt. seminaru («Problematyka, tendentsii i perspektyvy rozvytku voiennoi nauky ta osvity v umovakh suchasnykh hlobalnykh vyklykiv ta konfliktiv»)* [Collection of Abstracts of the International Scientific and Practical Seminar ("Problems, Trends and Prospects for the Development of Military Science and Education under Modern Global Challenges and Conflicts")]. Kyiv, November 28–29, 2024. (pp. 105–106) [in Ukrainian].

3. Boliubash, O. O., Ponomarov, A. O., Shulezhko, V. V., & Shulezhko, A. V. (2024). Poriadok zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia provedennia rekhnostsyrovky na mistsevosti v umovakh viiny [The Procedure for Using Unmanned Aerial Vehicles for Reconnaissance in the Field in Wartime]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 1 (19), 7–13. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.01> [in Ukrainian].

4. Zvyhlianych, S. M., Orlov, S. V., Kozhushko, Ya. M., & Lynnyk, M. F. (2024). Alhorytm imitatsiinoi modeli otsinky dii udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ [Algorithm of a Simulation Model for Assessing the Actions of Strike Unmanned Aerial Vehicles]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 1 (19), 50–55. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.06> [in Ukrainian].

5. Ivanov, D. A., Oliinyk, R. M., Zhyvets, Yu. M., & Ivanova, V. A. (2024). Rozviduvalno-udarni systemy v merezhetsentrychnii viini [Reconnaissance and Strike Systems in Network-Centric Warfare]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 1 (19), 56–61. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.07> [in Ukrainian].

6. Bahan, V. R., Kostiuk, V. V., Kuprinenko, O. M., & Zhyrna, O. V. (2024). Naukovo-metodychnyi pidkhid do vyznachennia stupenia nebezpeky povitrianoi tsili rozrakhunkom boiovoi mashyny z turelnoiu kulemetnoiu ustanovkoiu [Scientific and Methodological Approach to Determining the Degree of Danger of an Air Target by Calculating a Combat Vehicle with a Turret Machine Gun Mount]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 3 (21), 14–22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.02> [in Ukrainian].

7. Kudriashov, V. Ye., Kolomiitsev, O. V., & Rysovanyi, O. M. et al. (2024). Metodyka chyslovoho modeliuvannya vyznachennia pokaznyka efektyvnosti strilby raketoiu po riznykh povitrianykh tsiliakh pry vidpratsiuvanni tsilevkazivky z batareinoho komandnoho punktu

[Methodology for Numerical Modeling of Determining the Efficiency of Missile Firing at Various Air Targets when Practicing Target Designation from a Battery Command Post]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 1 (19), 107–116. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.13> [in Ukrainian].

8. Kudriashov, V. Ye., Kolomiitsev, O. V., Kulieshov, O. V. et al. (2024). Metodyka chyslovoho modeliuвання vyznachennia znachen umovnykh ymovirnostei urazhennia povitrianykh tsilei pry strilbi raketoiu z televiziinym optychnym vyzyrom boiovoi mashyny [Numerical Modeling Method for Determining the Values of Conditional Probabilities of Hitting Air Targets when Firing a Missile with a Television Optical Sight of a Combat Vehicle]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 1 (19), S. 57–69. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.07> [in Ukrainian].

9. Mehelbei, V. V., Kravchenko, S. O., Itsenko, D. S. et al. (2020). Metodyka otsiniuvannia zhyvuchosti systemy upravlinnia vohnem zenitnoho pidrozdilu (chastyny) [Methodology for Assessing the Survivability of the Fire Control System of an Anti-Aircraft Unit]. *Zb. nauk. prats DNDI VS OVT [Collection of Scientific Works of the National Research Institute of the Armed Forces of Ukraine]*, 3. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.3.2020.10> [in Ukrainian].

10. Kuts, N. H. (2022). Aerodynamika mekhanizovanoho kryla litaka [Aerodynamics of a Mechanized Aircraft Wing]. *Hraal nauky: Mizhnar. nauk. zhurn. [Grail of Science: International Scientific Journal]*, 23. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.12.2022.44> [in Ukrainian].

I. A. Pilkevych, I. A. Omelchuk, Yu. L. Bondarenko, K. M. Bilous

INDICATORS OF MANEUVERABILITY OF SHOCK UNMANNED AIRCRAFT WITH FIXED WING AS A FACTOR IN ENSURING SURVIVABILITY

Modern development of information systems creates the conditions for the development of the latest tools that allow you to automate and distance the operator and the management object, and thus more efficiently implement control processes. With the increase in complexity of automated systems and information technologies, their functionality increases and new opportunities for their use are increased. The intensive introduction of robotic systems caused by armed aggression is also available in the military sphere, in particular for transportation, intelligence and attacking actions. The operation of the video transmitter on board the mobile robotic complex has allowed to provide feedback channel with the operator, which significantly improved the capabilities of these systems. Significant achievements in the outlined direction were achieved in the creation of unmanned aerial vehicles of the shock and reconnaissance class. It is important for them to ensure the combat problem in the face of active opposition of the enemy. It is for this purpose that the aerial apparatus is equipped with a number of applications for protection against electronic warfare and fire damage. The means of counteracting radio electronic influence are intended to protect the channels of obtaining coordinates and control, and from fire damage by means of air defense, protecting the apparatus can be used by the use of structural features that improve its shunting characteristics. Systems of

weapons of air defense have some technical capabilities to respond to air purposes, that is, the detection of a target, the transfer of targets, and a rocket shot, which in flight also searches for targets and completion, which is also spent some time. Since these capabilities are due to their tactical characteristics, it is relevant to improve the characteristics of maneuverability in the UAV, which will allow to change its position in space during a time equal to, or is less than the time of response of the enemy air defense system, that is, it will allow him to perform the evasion maneuver. Possible ways to solve this problem are to introduce an improved electromagnetic type UAV type control system, which have less inertia compared to existing types and can provide rapid and unambiguous reincarnation of steering surfaces at a certain fixed angle and retention in such a clear position. Changing the position of the apparatus in the space in this case is due to the deviation of the steering surfaces on the steady angle with different time in the rejected position.

Keywords: *robotic complex; information system; combat use; automation system; controllability.*

М. С. Скорецький, В. А. Каптур, О. Г. Іваненко, М. П. Гаврилюк

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Показано складність вибору систем пеленгації джерел радіовипромінювання в процесі побудови системи ситуаційної обізнаності в умовах сучасної війни. Проведено аналіз досліджень і публікацій за темою статті. Запропоновано й описано методику оцінювання систем пеленгації джерел радіовипромінювання, яка ґрунтується на спрощеному методі аналізу ієрархій. Розглянуто підхід до визначення вагових коефіцієнтів на основі попарного порівняння критеріїв щодо їх застосування в конкретному експертному середовищі. Визначено критерії порівняння, виходячи з основних функціональних відмінностей різних систем пеленгації та їх особливостей із погляду експлуатаційно-технічних і сервісних параметрів, а також параметрів обслуговування. До складу критеріїв включено лише ті, що зазвичай висвітлені в публічних описах продуктів, які надаються виробником для загального ознайомлення. Формалізовано принципи оцінювання кожного із запропонованих критеріїв, що дозволяє безпосередньо перевести той чи інший технічний параметр у бальну оцінку. Крім того, описано алгоритм проведення обчислень із залученням відповідних експертів. Запропонована методика може бути використана як елемент системи багаторівневого оцінювання ефективності засобів електронної підтримки, зокрема для автоматизації процесу відбору технічних рішень під час розгортання засобів радіоелектронної розвідки в Силах оборони України. Показано, що наступним кроком у формуванні багаторівневої оцінки ефективності засобів електронної підтримки може стати проведення лабораторних досліджень для верифікації заявлених та фактичних характеристик того чи іншого виробу електронної підтримки.

Ключові слова: електронна підтримка; система пеленгації; радіоелектронна розвідка; джерело радіовипромінювання; метод аналізу ієрархій; критерій вибору; експертне оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Бурхливий розвиток технологій електронної підтримки, який відбувся в останні роки на тлі зростання кількості та різноманітності джерел радіовипромінювання (ДРВ) в радіоелектронному спектрі, став причиною появи широкого масиву систем пеленгації, які відрізняються за принципами дії, технічними характеристиками та рівнем інтеграції до наявних перспективних систем ситуаційної обізнаності. Серед таких рішень можна відзначити системи від компаній Aaronia [1], Dedrone [2], а також продукти від Rohde & Schwarz [3], Thales [4] та інших виробників. У цих умовах питання вибору конкретної системи пеленгації для виконання певних оперативних завдань стає все більш складним. Для здійснення такого вибору сьогодні необхідно проводити комплексний аналіз, який враховує технічні

© М. С. Скорецький, В. А. Каптур, О. Г. Іваненко, М. П. Гаврилюк, 2025

характеристики, економічну складову, умови експлуатації, необхідний рівень підготовки обслуговуючого персоналу та інші фактори.

Однак навіть проведенню такого аналізу мають передувати попередні дослідження, які ставлять за мету відсіяти заздалегідь недоцільні для розгляду варіанти, що не відповідають базовим вимогам ефективності, сумісності або адаптивності до конкретних умов застосування. Це дозволяє зосередити увагу на найбільш перспективних рішеннях та оптимізувати процес вибору системи пеленгації ДРВ для конкретних оперативних потреб.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття посилилася увага до систем пеленгації ДРВ як одного з ключових інструментів забезпечення радіоелектронної обстановки. У літературі все частіше розглядаються методи, що дозволяють об'єктивно оцінити ефективність таких систем залежно від умов застосування, конфігурації середовища, характеру сигналів та вимог до сумісності з наявними мережевими платформами. Зокрема, актуальним є питання комплексного багатокритерійного оцінювання пеленгаторів для їх подальшого впровадження в єдині системи управління та моніторингу.

У роботі [5] запропоновано методіку вибору технологій для побудови телекомунікаційних мереж доступу, яка базується на багатокритерійному аналізі та ієрархічному підході до прийняття рішень. Хоча дослідження безпосередньо не стосується пеленгаційних систем, його методологічна частина – структурований підхід до ранжування варіантів із урахуванням широкого спектра критеріїв – є релевантною для завдань попереднього оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ. Особливо важлива ідея скорочення обсягу варіантів, які розглядаються, за рахунок ранньої фільтрації, що дозволяє зосередитися на найбільш доцільних рішеннях.

Окрему категорію становлять дослідження, присвячені технічним характеристикам й обмеженням сучасних систем пеленгації. Наприклад, у публікації [6] детально розглянуто впливи багатоприменності, фазових спотворень і перешкод на точність пеленгації, що критично важливо для розгортання систем у складній радіоелектронній обстановці. Автори в [7] додатково проаналізували широкий спектр методів локалізації в бездротових сенсорних мережах, які мають безпосереднє відношення до сучасних систем пеленгації, що часто будуються на модульному мережевому принципі.

У контексті оцінювання ефективності варто згадати роботи Рамуґар Д. [8] і Саату Т. [9], де описано застосування методу аналізу ієрархій (АНР) та його нечітких модифікацій до задач вибору технічних рішень. Такі підходи дозволяють формалізувати взаємодію експертів та інтегрувати якісні й кількісні оцінки в єдиний механізм пріоритетизації. Це особливо важливо в умовах високої динаміки бойового середовища, де рішення мають прийматися швидко, але з урахуванням комплексу чинників: від мобільності до енергоспоживання.

Отже, сучасний науковий доробок дає підґрунтя для розроблення ефективної методіки попереднього оцінювання систем пеленгації, яка поєднує технічні критерії з експлуатаційними умовами та економічними обмеженнями. Адаптація та спрощення багатокритерійних методів, як продемонстровано в [1], може суттєво покращити процес вибору та впровадження пеленгаційних рішень у військову практику.

Метою статті є розроблення методики оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ на базі спрощеного варіанта методу аналізу ієрархій [10–12].

Виклад основного матеріалу. Зазначена методика полягає в одержанні зваженого показника на основі бальних оцінок низки експлуатаційно-технічних критеріїв та їх вагових коефіцієнтів, обчислених шляхом їх попарного порівняння.

Особливістю вибраного підходу є те, що в ході проведення порівняльного аналізу відбувається взаємне обговорення деякої проблеми групою людей (експертів), при цьому кожен із них може висловлювати та модифікувати свої думки, у результаті чого обирається компромісний груповий висновок щодо певного критерію, який характеризує обговорювану проблему. У підсумку описаної вище взаємодії експертів у рамках експертної групи забезпечується об'єднання їх думок раціональним чином і, як результат, формування узагальненої оцінки того чи іншого критерію відносно конкретного об'єкта порівняння.

Для оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ застосовують лінійну згортку такого вигляду:

$$Q = \sum_{i=1}^n K_i B_i, \quad (1)$$

де K_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;

B_i – бальна оцінка i -го критерію.

Вагові коефіцієнти для заздалегідь прийнятих критеріїв обчислюють за методом їх попарного порівняння. Для цього формується порівняльна матриця A розміром $n \times n$ елементів a_{ij} , де кожний із них є результатом зваженого експертного порівняння i -го та j -го критеріїв. При цьому, якщо i -й критерій вважається експертами вагомим, ніж j -й, то елемент a_{ij} повинен дорівнювати 2 (у свою чергу, елемент a_{ji} має дорівнювати 0), а в разі, коли i -й критерій вважається менш вагомим, ніж j -й, то елемент a_{ij} повинен дорівнювати 0 (а a_{ji} має дорівнювати 2). Якщо ж i -й та j -й критерії вважаються рівнозначними, то елементи a_{ij} та a_{ji} повинні дорівнювати 1. Елементи головної діагоналі матриці дорівнюють 1. Приклад оформлення такої матриці наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Приклад оформлення матриці попарного порівняння критеріїв

	Критерій 1	Критерій 2	Критерій 3	...	Критерій n
Критерій 1	1	x	x	x	x
Критерій 2		1	X	x	x
Критерій 3			1	x	x
...				...	x
Критерій n					1

Отже, у результаті порівняння критеріїв одержуємо матрицю попарних порівнянь, значення елементів a_{ij} якої відображають суб'єктивний висновок експертів щодо важливості i -го критерію порівняно з j -м у конкретних умовах експертизи.

Для визначення вагових коефіцієнтів K_i i -го критерію необхідно знайти суму елементів матриці кожного рядка:

$$s_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2)$$

де n – кількість критеріїв.

На наступному кроці необхідно обчислити загальну суму елементів матриці A :

$$S_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{i=1}^n s_i. \quad (3)$$

Нормоване значення вагового коефіцієнта K_i i -го критерію знаходимо за формулою

$$K_i = \frac{s_i}{S_k}, \quad i = 1 \dots n. \quad (4)$$

Для проведення порівняльного аналізу необхідно визначити критерії, відносно яких будемо порівнювати задані системи пеленгації ДРВ. Критерії оцінювання є об'єктивними та не залежать від суб'єктивної думки окремого фахівця під час оцінювання систем пеленгації ДРВ.

Аналіз сучасних технологічних рішень у сфері виявлення ДРВ [1–4] дозволяє виділити критерії та бальні діапазони (від 0 до 9) для здійснення оцінювання. Розглянемо їх детальніше.

1. Орієнтовна вартість мережі з 10 засобів (включно з таким допоміжним обладнанням: пеленгатори, радіомодуль, системи зв'язку й автономного живлення, комплекти для встановлення антенно-фідерних систем тощо). Визначення бальної оцінки відбувається відповідно до такої схеми: до 10 тис. дол. США (тут і далі – включно) – 9 балів; до 50 тис. дол. США – 8 балів; до 100 тис. дол. США – 7 балів; до 500 тис. дол. США – 6 балів; до 1 млн дол. США – 5 балів; до 5 млн дол. США – 4 бали; до 10 млн дол. США – 3 бали; до 25 млн дол. США – 2 бали; до 50 млн дол. США – 1 бал; більше 50 млн дол. США – 0 балів.

2. Діапазон робочих температур визначають як округлений до найближчого цілого значення результат суми значень за верхній та нижній діапазони робочих температур (у градусах Цельсія). Максимальна сума становить 9 балів. Маємо такий перелік значень: нижній поріг: (4) нижче -40 °С; (3,5) від -40 °С; (2,5) від -30 °С; (1,5) від -20 °С; (0,5) від -10 °С; верхній поріг: (0) від 0 °С та вище; (0,5) до 25 °С; (1,5) до 35 °С; (2,5) до 45 °С; (3,5) до 55 °С; (5) вище 55 °С.

3. Габаритні розміри зовнішнього штатного пристрою виявлення ДРВ (максимальне значення об'ємної або фактичної ваги) визначають як найбільшу з двох величин (фактична або об'ємна вага), розраховану за такою формулою: довжина * ширина * висота / 4000, при цьому величини вказано в сантиметрах [13]. Бальну оцінку встановлюють відповідно до такої схеми: до 5 кг (тут і далі – включно) – 9 балів; до 10 кг – 8 балів; до 20 кг – 7 балів; до 35 кг – 6 балів; до 50 кг – 5 балів; до 65 кг – 4 бали; до 80 кг – 3 бали; до 90 кг – 2 бали; до 100 кг – 1 бал; більше 100 кг – 0 балів.

4. Ступінь захисту оболонки (код IP), відповідно до міжнародних стандартів IEC 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96, ДСТУ EN 60529:2018) [14], визначають як округлений до найближчого цілого значення результат суми оцінок за першу цифру (характеризує, наскільки пристрій захищений від проникнення твердих предметів всередину корпусу), а також за другу цифру (наскільки він захищений від води). Максимальна сума – 9 балів. Перелік значень: для першої цифри: (0) IP 3X; (1) IP 4X; (2,5) IP 5X; для другої цифри: (4) IP 6X; (0,5) IP X1; (1) IP X2; (1,5) IP X3; (2) IP X4; (2,5) IP X5; (3) IP X6; (4) IP X7; (5) IP X8.

5. Максимально припустима відстань від антени до основного блоку й системи зв'язку, якої можна досягти з використанням штатних (що входять у комплект стандартного постачання) засобів підключення (між комплексом та робочим місцем оператора). Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: більше 500 м – 9 балів; до 500 м (тут і далі – включно) – 8 балів; до 400 м – 7 балів; до 300 м – 6 балів; до 200 м – 5 балів; до 150 м – 4 бали; до 100 м – 3 бали; до 50 м – 2 бали; до 10 м – 1 бал; відстань дорівнює 0 м – 0 балів.

6. Оцінка складності інсталяції в людино-годинах (із розрахунку на один комплект) з урахуванням маскуванню комплексу. Бальне оцінювання здійснюють згідно з такою схемою: до 0,5 людиногодин (тут і далі – включно) – 9 балів; до 2 людиногодин – 8 балів; до 4 людиногодин – 7 балів; до 8 людиногодин – 6 балів; до 16 людиногодин – 5 балів; до 32 людиногодин – 4 бали; до 64 людиногодин – 3 бали; до 128 людиногодин – 2 бали; до 256 людиногодин – 1 бал; більше 256 людиногодин – 0 балів.

7. Наявність API (Application Programming Interface) [15]. Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: API наявне, повністю достатнє для інтеграції із системами ситуаційної обізнаності [16], є можливість отримати зміни від виробника в разі появи нових вимог – 9 балів; API наявне, повністю достатнє для інтеграції із системою ситуаційної обізнаності, немає можливості модифікації API – 8 балів; резерв (застосовується на розсуд експерта) – 7 балів; резерв (застосовується на розсуд експерта) – 6 балів; API наявне, але дані потребують стороннього опрацювання (передаються фактичні записи сигналів або їх параметри, які потребують оброблення задля отримання конкретних пеленгацій) – 5 балів; резерв (застосовується на розсуд експерта) – 4 або 3 бали; немає наявного API, виробник готовий розробити в зрозумілі й гарантовані терміни – 2 бали; немає наявного API, виробник не надає засобів для інтеграції, вона можлива через нештатні засоби – 1 бал; немає наявного API, виробник не надає засобів для інтеграції, альтернативні методи інтеграції не відомі (або інформація відсутня) – 0 балів.

8. Індикацію / сигналізацію в разі виявлення цілі (ДРВ) визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $ROUND((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (36), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюється в 0 балів. Перелік значень: (1) вібросигналізація; (1) звукова сигналізація; (1) світлова сигналізація; (1) наявність РКС (рідкокристалічного) індикатора; (2) наявність графічного дисплея;

(2) відображення на дисплеї / екрані піктограми, що сигналізує про присутність ворожого БПЛА / БпАК; (3) визначення типу ДРВ (БПЛА, БпАК, РЕБ тощо); (4) відображення різновиду ДРВ («Орлан», «Ланцет», Zala, Mavic, Autel тощо); (4) відображення відстані до ДРВ; (5) відображення азимута на ДРВ; (6) відображення на екрані мапи та триангуляційних направляючих; (6) відображення на екрані спектрограми (водоспаду).

9. Максимальна похибка відхилення пеленга для діапазону частот від 300 МГц до 6 ГГц (в ідеальних умовах). Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: до $0,5^\circ$ (тут і далі – включно) – 9 балів; до $0,8^\circ$ – 8 балів; до $1,0^\circ$ – 7 балів; до $3,0^\circ$ – 6 балів; до $5,0^\circ$ – 5 балів; до $7,0^\circ$ – 4 бали; до $9,0^\circ$ – 3 бали; до $12,0^\circ$ – 2 бали; до $15,0^\circ$ – 1 бал; більше $15,0^\circ$ – 0 балів.

10. Діапазон робочих частот визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (28), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюється в 0 балів. Перелік значень: (1) до 30 МГц; (2) від 30 МГц до 400 МГц; (6) від 400 МГц до 2 000 МГц; (6) від 2 000 МГц до 6 000 МГц; (4) від 6 000 МГц до 10 000 МГц; (3) від 10 000 МГц до 12 000 МГц; (3) від 12 000 МГц до 15 000 МГц; (2) від 15 000 МГц до 20 000 МГц; (1) більше 20 000 МГц.

11. Сектор ведення моніторингу розраховують як суму оцінок за горизонтальний кут охоплення (максимум 5 балів) та вертикальний кут охоплення (максимум 4 бали). Оцінку за горизонтальний кут охоплення визначають таким чином: $\text{ROUND}(G * 5 / 360^\circ)$, де G – заявлений виробником горизонтальний кут охоплення (максимальна величина становить 360°). Оцінку за вертикальний кут охоплення обчислюють у такий спосіб: $\text{ROUND}(V * 4 / 90^\circ)$, де V – заявлений виробником вертикальний кут охоплення (максимальна величина становить 90°).

12. Можливості щодо аналізу ДРВ, які працюють у режимі програмної перебудови робочої частоти (ППРЧ) [17], визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (11), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюємо в 0 балів. Перелік значень: (2) виявлення сигналу з ППРЧ; (2) пеленгація сигналу з ППРЧ; (3) визначення декількох комплексів місцеположення та відображення координат ДРВ із ППРЧ на мапі в режимі реального часу з імовірністю не менше 0,85; (4) ідентифікація сигналів із ППРЧ. Якщо інформація відсутня, то 0 балів.

13. Можливість роботи в автоматичному режимі (детекцію) визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (45), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюють в 0 балів. Перелік значень: (3) автоматичний розбір DJI drone ID [18]; (3) автоматичний розбір RID

[19]; (3) автоматичний розбір OpenDroneId [20]; (3) автоматичний пеленг дронів DJI (не drone ID); (2) автоматичний пеленг дронів AUTEL [21]; (2) автоматичний пеленг TBS [22]; (2) автоматичний пеленг ELRS [23]; (1) автоматичний пеленг analog Video 900 МГц; (2) автоматичний пеленг analog Video 1,2 ГГц; (1) автоматичний пеленг analog Video 2,4 ГГц; (2) автоматичний пеленг analog Video 5,8 ГГц; (3) автоматичний пеленг «Орлан 10»; (3) автоматичний пеленг «Орлан 30»; (3) автоматичний пеленг Zala / «Ланцет»; (2) автоматичний пеленг Supercam; (2) автоматичний пеленг Vector; (2) автоматичний пеленг Eleron; (2) автоматичний пеленг Orion; (2) автоматичний пеленг Merlin; (2) автоматичний пеленг Granat 1–4.

14. Супутникова система навігації (GNSS) [24] – це сукупність приладів, що забезпечують орієнтування об'єкта в просторі. Визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (13), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюють у 0 балів. Перелік значень: (0) відсутня система навігації; (5) наявність системи GPS; (4) наявність системи ГЛОНАСС; (3) наявність системи Galileo; (1) наявність системи Beidou.

15. Смуга миттєвого огляду. Бальне оцінювання здійснюють відповідно до такої схеми: більше 200 МГц (тут і далі – включно) – 9 балів; більше 150 МГц – 8 балів; більше 100 МГц – 7 балів; більше 80 МГц – 6 балів; більше 60 МГц – 5 балів; більше 40 МГц – 4 бали; більше 20 МГц – 3 бали; більше 10 МГц – 2 бали; більше 5 МГц – 1 бал; менше 5 МГц – 0 балів.

16. Швидкість сканування діапазону частот (SCAN, SWEEP або інше). Бальну оцінку визначають відповідно до такої схеми: більше 1 ТГц (тут і далі – включно) – 9 балів; більше 100 ГГц – 8 балів; більше 10 ГГц – 7 балів; більше 1 ГГц – 6 балів; більше 100 МГц – 5 балів; більше 10 МГц – 4 бали; більше 1 МГц – 3 бали; більше 100 кГц – 2 бали; більше 10 кГц – 1 бал; менше 10 кГц – 0 балів.

17. Максимальна заявлена чутливість. Якщо чутливість приймача є різною в різних діапазонах, то використовують максимальне зі значень (сама чутливість приймача без застосування підсилювача). Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: більше -170 dbm (тут і далі – включно) – 9 балів; більше -160 dbm – 8 балів; більше -150 dbm – 7 балів; більше -140 dbm – 6 балів; більше -130 dbm – 5 балів; більше -120 dbm – 4 бали; більше -110 dbm – 3 бали; більше -80 dbm – 2 бали; більше -60 dbm – 1 бал; менше -60 dbm – 0 балів.

18. Дальність виявлення (в ідеальних умовах прямої видимості) ДРВ із потужністю до 1 Вт у смузі частот до 40 МГц. Бальне оцінювання проводять відповідно до такої схеми: більше 80 км (тут і далі – включно) – 9 балів; до 80 км – 8 балів; до 70 км – 7 балів; до 50 км – 6 балів; до 30 км – 5 балів; до 20 км – 4 бали; до 10 км – 3 бали; до 7 км – 2 бали; до 3 км – 1 бал; до 0,5 км – 0 балів.

19. Час автономної роботи. Бальну оцінку визначають відповідно до такої схеми: більше 21 год. – 9 балів; до 21 год. (тут і далі – включно) – 8 балів; до 18 год. – 7 балів; до 15 год. – 6 балів; до 12 год. – 5 балів; до 9 год. – 4 бали; до 6 год. – 3 бали; до 3 год. – 2 бали; до 1 год. – 1 бал. Не комплектується засобами автономної роботи – 0 балів.

20. Наявність інтерфейсів та систем зв'язку, управління визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (26), S – сума вибраних значень). Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюємо в 0 балів. Перелік значень: (1) 12/24/48 В постійного струму; (1) 240 В змінного струму; (1) 3G/4G-модем; (2) Ethernet PoE IEEE 802,3 bt; (2) GigE (10/100/1000 Base-T); (1) HDMI; (1) microSD (SDXC); (1) mSATA; (1) RJ45; (1) RS 232; (1) ВЧ-роз'єми; (2) USB 2.0 / USB 3.0; (2) клієнтський цифровий інтерфейс (GbE); (2) мережевий цифровий інтерфейси (GbE); (3) стільниковий зв'язок; (4) наявність додаткових інтерфейсів для віддаленого керування пеленгатором.

21. Можливості внутрішнього програмного забезпечення визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (30), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюють у 0 балів. Перелік значень: (1) логування детекцій у внутрішній пам'яті; (2) формування звіту наявних детекцій; (3) збереження I/Q сигналів [25] у внутрішній пам'яті; (3) збереження I/Q сигналів у хмарному просторі; (8) наявність бази сигнатур та можливості автоматичної детекції сигналу та його класифікації; (5) можливість автоматичної пеленгації сигналів до XX мілісекунд; (4) множинне ведення цілей (більше чотирьох); (4) кількість діапазонів, у яких можна одночасно відстежувати цілі (не менше чотирьох).

У разі відсутності інформації за тим чи іншим критерієм встановлюється оцінка 0 балів. При цьому наприкінці оцінювання важливим є зазначення повноти отриманої для оцінювання інформації.

Аналіз результатів обчислення вагових коефіцієнтів за формулою (4) на основі матриці попарного порівняння та результати бального оцінювання критеріїв на базі експертних висновків для всіх систем пеленгації, а також виконання розрахункових операцій згідно з виразом (1) дозволяють зробити висновок щодо порівняння декількох об'єктів і вибрати найкращий із них. Зауважимо, що кількість балів (мінімум 0, максимум 9), присвоєних кожному критерію для кожного порівнюваного об'єкта, формується на основі досвіду фахівців (експертів) та з урахуванням показників (бажано задокументованих), що характеризують той чи інший об'єкт порівняння.

Висновки

1. Запропонована методика оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ на основі спрощеного методу аналізу ієрархій може бути покладена в основу системи багаторівневого оцінювання ефективності засобів електронної підтримки.

2. Критерії порівняння були сформовані з урахуванням функціональних відмінностей систем пеленгації, їх технічних, експлуатаційних та сервісних характеристик, що дозволяє адаптувати підхід до конкретних умов застосування.

3. Результати можуть бути використані для автоматизації процесу відбору технічних рішень у ході розгортання засобів радіоелектронної розвідки у військових або спеціальних

застосуваннях із урахуванням динаміки розвитку ворожих технічних засобів та конкретних умов.

Перспективи подальших досліджень. Наступним кроком у формуванні багаторівневого оцінювання ефективності засобів електронної підтримки може стати проведення лабораторних досліджень для верифікації заявлених та фактичних характеристик того чи іншого виробу електронної підтримки. Зокрема, із цією метою має бути розроблено методика лабораторних досліджень виробів для оцінювання рівня їх чутливості до сигналів типових ДРВ.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Aaronia AG. Direction Finding and Signal Monitoring Systems. URL: <https://www.aaronia.com> (last accessed: 25.05.2025).
2. Dedrone. Counter-Drone Technologies Overview. URL: <https://www.dedrone.com> (last accessed: 25.05.2025).
3. Rohde & Schwarz. Radio Monitoring and Direction Finding Systems. URL: <https://www.rohde-schwarz.com> (last accessed: 25.05.2025).
4. Thales Group. Electronic Warfare Solutions. URL: <https://www.thalesgroup.com> (last accessed: 25.05.2025).
5. Kaptur V., & Mammadov E. Methodology of Selecting Appropriate Technologies for Constructing Telecommunication Access Networks // PIC S&T. 2015. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357278>
6. Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays / Rusek F., Persson D., Lau B. K., et al. // IEEE Signal Processing Magazine. 2013. Vol. 30 (1). P. 40–60. <https://doi.org/10.1109/msp.2011.2178495>
7. Mao G., Fidan B., & Anderson B. Wireless Sensor Network Localization Techniques // Computer Networks. 2007. Vol. 51 (10). P. 2529–2553. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.11.018>
8. Božanić D., Pamučar D., Čirović G. (2015). Modification of the AHP Using Fuzzy Logic for Decision Making in Military Logistics // Serbian Journal of Management. Vol. 10. P. 151–171. <https://doi.org/10.5937/sjm10-7223>
9. Saaty T. L. Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. RWS Publications, 2008.
10. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
11. Ernest H. Forman, Saul I. Gass. The Analytic Hierarchy Process – An Exposition // Operations Research. 1983. Vol. 49, № 4. P. 469–486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>
12. Luis G. Vargas. An Overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications // European Journal of Operational Research. 1990. Vol. 48, № 1. P. 2–8. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-h](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-h)
13. ICAO. Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air. Montreal: ICAO, 2021.

14. International Electrotechnical Commission. IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code). Geneva: IEC, 2013.
15. Fielding R. T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Dissertation. University of California, Irvine, 2000.
16. NATO. Federated Mission Networking – Interoperability Profiles. Ed. A, Version 1. NATO Standardization Office, 2021.
17. Mitola J. Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML. Wiley, 2005. 473 p. <https://doi.org/10.1002/0471773735>
18. DJI. Drone ID and Remote Identification Overview. URL: <https://www.dji.com> (last accessed: 25.05.2025).
19. ASTM International. Standard Specification for Remote ID. ASTM F3411-22a, 2022.
20. OpenDroneID Working Group. Open Drone Identification Protocol. URL: <https://opendroneid.org> (last accessed: 25.05.2025).
21. Autel Robotics. EVO II Dual Series – RF Capabilities. URL: <https://auteldrones.com> (last accessed: 25.05.2025).
22. Team BlackSheep. TBS Crossfire Technical Documentation. URL: <https://www.team-blacksheep.com> (last accessed: 25.05.2025).
23. ExpressLRS. Official Documentation. URL: <https://www.expresslrs.org> (last accessed: 25.05.2025).
24. GPS.gov. Global Positioning System Overview. URL: <https://www.gps.gov> (last accessed: 25.05.2025).
25. ITU. Technical Characteristics of I/Q Data Acquisition and Processing in Spectrum Monitoring. ITU-R SM.1875-0. Geneva, 2010.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2025.

REFERENCES

1. Aaronia AG. *Direction Finding and Signal Monitoring Systems*. (n.d.). Retrived from <https://www.aaronia.com>
2. DEDRONE. *Counter-Drone Technologies Overview*. (n.d.). Retrived from <https://www.dedrone.com>
3. Rohde & Schwarz. *Radio Monitoring and Direction Finding Systems*. (n.d.). Retrived from <https://www.rohde-schwarz.com>
4. Thales Group. *Electronic Warfare Solutions*. (n.d.). Retrived from <https://www.thalesgroup.com>
5. Kaptur, V., & Mammadov, E. (2015). Methodology of Selecting Appropriate Technologies for Constructing Telecommunication Access Networks. *PIC S&T*. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357278>
6. Rusek, F., Persson, D., & Lau, B. K. et al. (2013). Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30 (1), 40–60. <https://doi.org/10.1109/msp.2011.2178495>
7. Mao, G., Fidan, B., & Anderson, B. (2007). Wireless Sensor Network Localization

Techniques. *Computer Networks*, 51 (10), 2529–2553. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.11.018>

8. Božanić, D., Pamučar, D., & Ćirović, G. (2015). Modification of the AHP Using Fuzzy Logic for Decision Making in Military Logistics. *Serbian Journal of Management*, 10 (1), 151–171. <https://doi.org/10.5937/sjm10-7223>

9. Saaty, T. L. (2008). *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. RWS Publications.

10. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York : McGraw-Hill.

11. Ernest H. Forman, Saul I. Gass. (1983). The Analytic Hierarchy Process – An Exposition. *Operations Research*, 49, 4, 469–486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>

12. Luis G. Vargas. (1990). An Overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications. *European Journal of Operational Research*, 48, 1, 2–8. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-h](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-h)

13. ICAO. (2021). *Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air*. Montreal.

14. *International Electrotechnical Commission. IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)*. (2013). Geneva.

15. Fielding, R. T. (2000). *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Dissertation*. University of California, Irvine.

16. NATO. (2021). *Federated Mission Networking – Interoperability Profiles*. Ed. A, Version 1. NATO Standardization Office.

17. Mitola, J. (2006). *Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471773735>

18. DJI. *Drone ID and Remote Identification Overview*. (n.d.). Retrieved from <https://www.dji.com>

19. ASTM International. (2022). *Standard Specification for Remote ID. ASTM F3411-22a*.

20. OpenDroneID Working Group. (n.d.). *Open Drone Identification Protocol*. Retrieved from <https://opendroneid.org>

21. Autel Robotics. (n.d.). *EVO II Dual Series – RF Capabilities*. Retrieved from <https://auteldrones.com>

22. Team BlackSheep. (n.d.). *TBS Crossfire Technical Documentation*. Retrieved from <https://www.team-blacksheep.com>

23. ExpressLRS. (n.d.). *Official Documentation*. Retrieved from <https://www.expresslrs.org>

24. GPS.gov. (n.d.). *Global Positioning System Overview*. Retrieved from <https://www.gps.gov>

25. ITU. (2010). *Technical Characteristics of I/Q Data Acquisition and Processing in Spectrum Monitoring. ITU-R SM.1875-0*. Geneva.

M. S. Skoretskyi, V. A. Kaptur, O. G. Ivanenko, M. P. Havryliuk
ASSESSMENT METHODOLOGY FOR THE EFFECTIVENESS OF RADIO EMISSION
DIRECTION-FINDING SYSTEMS

The article highlights the complexity of selecting direction-finding systems for radio emission sources in the process of building a situational awareness system under the conditions

of modern warfare. A thorough analysis of current research and publications relevant to the topic has been conducted. A methodology for evaluating direction-finding systems is proposed and described. This methodology is based on a simplified Analytic Hierarchy Process and is adapted for practical use in expert decision-making environments.

The approach includes determining weight coefficients through pairwise comparison of evaluation criteria, considering the context of specific expert environments. The selection of criteria is grounded in the key functional differences between various direction-finding systems, as well as their performance in terms of operational-technical characteristics, service-related parameters, and maintenance requirements. Only those criteria that are typically present in publicly available product descriptions provided by manufacturers for general reference have been included in the evaluation model.

Each criterion is formalized through clear evaluation principles, which allow for the direct conversion of a given technical parameter into a score-based rating. A detailed algorithm for performing calculations with the participation of subject matter experts is presented. The proposed methodology can serve as a component of a multi-level assessment system for the efficiency of electronic support measures. It also has practical application for automating the selection process of technical solutions during the deployment of electronic intelligence assets within the Defense Forces of Ukraine.

Furthermore, it is argued that a logical next step in the development of a comprehensive multi-level evaluation framework for electronic support measures would be the execution of laboratory-based research to verify the declared and actual characteristics of specific electronic support systems. This would significantly enhance the reliability of system selection processes and contribute to the operational readiness of defense technologies in real-world conditions.

Keywords: *electronic support; direction-finding system; electronic intelligence; radio emission source; analytic hierarchy process; selection criteria; expert evaluation.*

О. Р. Рихальський, С. В. Петраш, А. В. Антонюк

МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕННИХ СИСТЕМ ІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЇХ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ PLHR-ВИПРОМІНЮВАННЯ В ІОНОСФЕРІ

За допомогою супутникових досліджень був відкритий ефект відображення в іоносфері гармонічного випромінювання електромереж (power line harmonic radiation – PLHR). Встановлено, що потужні споживачі електроенергії формують на частотах, пов'язаних із частотою електромереж і її численними гармоніками, техногенні сигнали. Вони викликають зміни параметрів плазми та електромагнітного поля в іоносфері. Проте, незважаючи на багаторазові спроби, на сьогодні немає пояснення ефекту PLHR.

Метою статті є часткове якісне дослідження числовим методом впливу випромінювання високовольтних ліній електропередач на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері на основі теорій електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

Високовольтні лінії електропередач розглянуто як антенну систему, яка складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним елементарним електричним вібраторам, які підняті за допомогою опор над землею поверхнею. Числовим методом здійснено моделювання повітряних ліній електропередач різних класів та конфігурацій як антенних систем у програмному середовищі MMANA. Зокрема, досліджено зміну коефіцієнта підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ліній електропередач у смузі частот гармонічного випромінювання електромереж PLHR. Діаграма спрямованості горизонтального елементарного електричного вібратора має пелюстковий характер із певною глибиною провалів залежно від параметрів Землі та її поверхні, уздовж якої випромінювання відсутнє. Явище інтерференції впливає на зміну коефіцієнта підсилення залежно від частоти та висоти встановлення антени. Також має значення клас моделі повітряної лінії та її геометричні розміри.

Отримані результати чисельного моделювання не суперечать висновкам аналітичного методу дослідження – теорії електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

Необхідна для реєстрації мультиплетів інтенсивність ліній PLHR досягається, зокрема, за рахунок значної об'ємної густини енергії поля електромереж, зміну якої досліджено чисельним моделюванням (аналіз зміни коефіцієнта підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ліній електропередач у визначеній смузі частот). У разі високої об'ємної густини енергії поля електромереж виникають мультиплети з великою кількістю сателітів (до десяти і більше) з інтервалом 50 Гц. Цю особливість якісно підтверджено зміною коефіцієнта підсилення за зміни частоти на 50 Гц, який приймає достатньо великі значення. У разі низької густини енергії поля електромереж та високих концентрацій вільних електронів можливий режим генерації нового

електромагнітного поля, що пояснює можливість утворення мультиплетів з інтервалом 100 Гц між лініями. Вказана особливість якісно підтверджена значеннями коефіцієнта підсилення на частотах, кратних 100 Гц, які не менше 2 дБі.

***Ключові слова:** випромінювання електромереж; елементарний електричний вібратор; діаграма спрямованості; напруженість електричного поля; напруженість магнітного поля; іоносфера; випромінювання іоносфери.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогодні є значний обсяг експериментальних даних супутникових досліджень, які свідчать про наявність в іоносфері кластерів (мультиплетів) спектральних ліній гармонік із частотами 50 (60) Гц (до 10–15 ліній), центрованих біля середньої частоти, яка змінюється в широкому діапазоні – від 1 кГц до 15 кГц [1]. Ці дані отримано в експериментах на штучних супутниках Землі (ШСЗ) [1–11], що підтверджує проникнення сигналів на гармоніках із частотами електромереж в іоносферу через їх неповне затухання. Вони можуть бути виміряні за наявності на борту високочутливих датчиків.

Це явище вивчається для встановлення кількісних залежностей та можливих негативних наслідків у разі подальшого збільшення виробництва електроенергії. Водночас дослідження ефекту PLHR (power line harmonic radiation) має самостійне фундаментальне значення як один із проявів взаємодії електромагнітного поля із частково іонізованою плазмою.

Об'єктом дослідження є механізм формування гармонічного випромінювання електромереж (PLHR) в іоносфері, запропонований в [1], а предметом – вплив на зміну густини поля електромереж (інтенсивність ліній PLHR для реєстрації мультиплетів) коефіцієнта підсилення високовольтних ліній електропередач (ЛЕП), які розглянуто як антенну систему, що складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним елементарним електричним вібраторам (ЕЕВ), які підняті за допомогою опор над землею поверхнею, у відповідній смузі частот.

Метою роботи є часткове якісне дослідження впливу випромінювання високовольтних ЛЕП на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, запропонований в [1], на основі теорій електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері числовим методом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що, незважаючи на багаторазові спроби, на сьогодні пояснення ефекту PLHR немає. Навіть про ділянку, де утворюються PLHR, тривають суперечки: розглядаються гіпотези, згідно з якими вони або створюються через нелінійні взаємодії в іоносфері, або ж генеруються на земній поверхні через спотворення форми струму у високовольтних лініях електропередач.

В [1] обґрунтовано механізм формування низькочастотних гармонічних мультиплетів в іоносфері в рамках моделі взаємодії електронів із магнітним полем Землі та випромінюванням ліній електромереж із частотою 50 (60) Гц, що дозволяє інтерпретувати частотні особливості спостережуваних спектрів, зареєстрованих ШСЗ [1].

У повітряних ЛЕП змінного струму поле спрямованої хвилі неекрановане й існує у вільному просторі довкола ліній, тому електромережі протяжністю сотні й тисячі

кілометрів можна розглядати як антени значної потужності випромінювання. Основним фактором, що визначає пропускну здатність і дальність передачі повітряних ліній, є величина її лінійної напруги.

До відкритих ЛЕП належать: симетричні двопроводові лінії напругою 0,4 кВ; трипроводові лінії напругою 10 кВ; шестипроводові лінії для напруг 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ; дев'ятипроводові лінії для напруги 330 кВ (рис. 1а); дванадцятипроводові лінії для напруг 500 кВ, 750 кВ (рис. 1б), виконані з круглих проводів [2, 11].

У [2] аналітичним методом проведено розрахунок складових амплітуди напруженості електричного поля ЕЕВ у ближній зоні, результати якого свідчать про дуже низьку потужність випромінювання. У дальній зоні розрахована потужність випромінювання становить 150,63 кВт за рахунок струму живлення 2,93 кА, оскільки електричний розмір такої антени дуже малий. Визначена амплітуда напруженості електричного поля в іоносфері з урахуванням ослаблення залежно від висоти шару змінюється в межах від 0,301 мВ/м до 6,01 мВ/м для висот від 100 км до 500 км [12–16].

Отже, необхідно провести часткове якісне чисельне моделювання зміни коефіцієнта підсилення високовольтних ЛЕП як антенної системи, що складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним ЕЕВ, які підняті за допомогою опор над земною поверхнею, у відповідній смузі частот.

Формулювання завдання дослідження. Доцільно провести часткове якісне дослідження гіпотези, запропонованої в [1], про механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, розглядаючи повітряні ЛЕП як антенну систему, яка складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним ЕЕВ, що підняті за допомогою опор над земною поверхнею.

Виклад основного матеріалу. Серед сучасних прикладних програм (ELNEC, EZNEC, NEC4WIN95, MMANA) найменше обмежень має програма відомого японського програміста Makoto Mori (JE3NHT) – MMANA (максимальна кількість: проводів – 512, джерел – 64, навантажень – 100, точок розрахунку – 8192) [12]. Збіг практичних результатів із розрахунковими достатньо високий [12].

Горизонтальні антени низько підвішені над реальною земною поверхнею (рівною, пласкою з відносною діелектричною проникністю 13 та провідністю 5 мСм/м) [13], [12]. Земля в моделі діє як ідеальний рефлектор (насправді таким не будучи), і поле, створене такою антеною, додається до поля, відбитого від ідеальної поверхні землі, у результаті маємо еквівалентність двоелементній антені, спрямованій у зеніт.

Моделювання конструкцій і розмірів ЛЕП проводилося відповідно до їх класифікації за робочою напругою [11].

За допомогою програми MMANA розраховано параметри та характеристики антенних систем повітряних ЛЕП із різними класами напруги та відповідної конструкції. Обчислення проводилося на частотах від 1 кГц до 5 кГц із кроком зміни частоти 50 Гц, що відповідає смузі частот гармонічного випромінювання електромреж PLHR.

Аналіз отриманих даних. На рис. 1 зображено модель повітряної ЛЕП середнього класу напруги 10 кВ, зміна коефіцієнта підсилення (G_a , dBi) та відношення рівня випромінювання вперед / назад (F/B) від частоти, діаграми спрямованості (ДС) антени

в горизонтальній та вертикальній площинах на частоті 4 кГц.

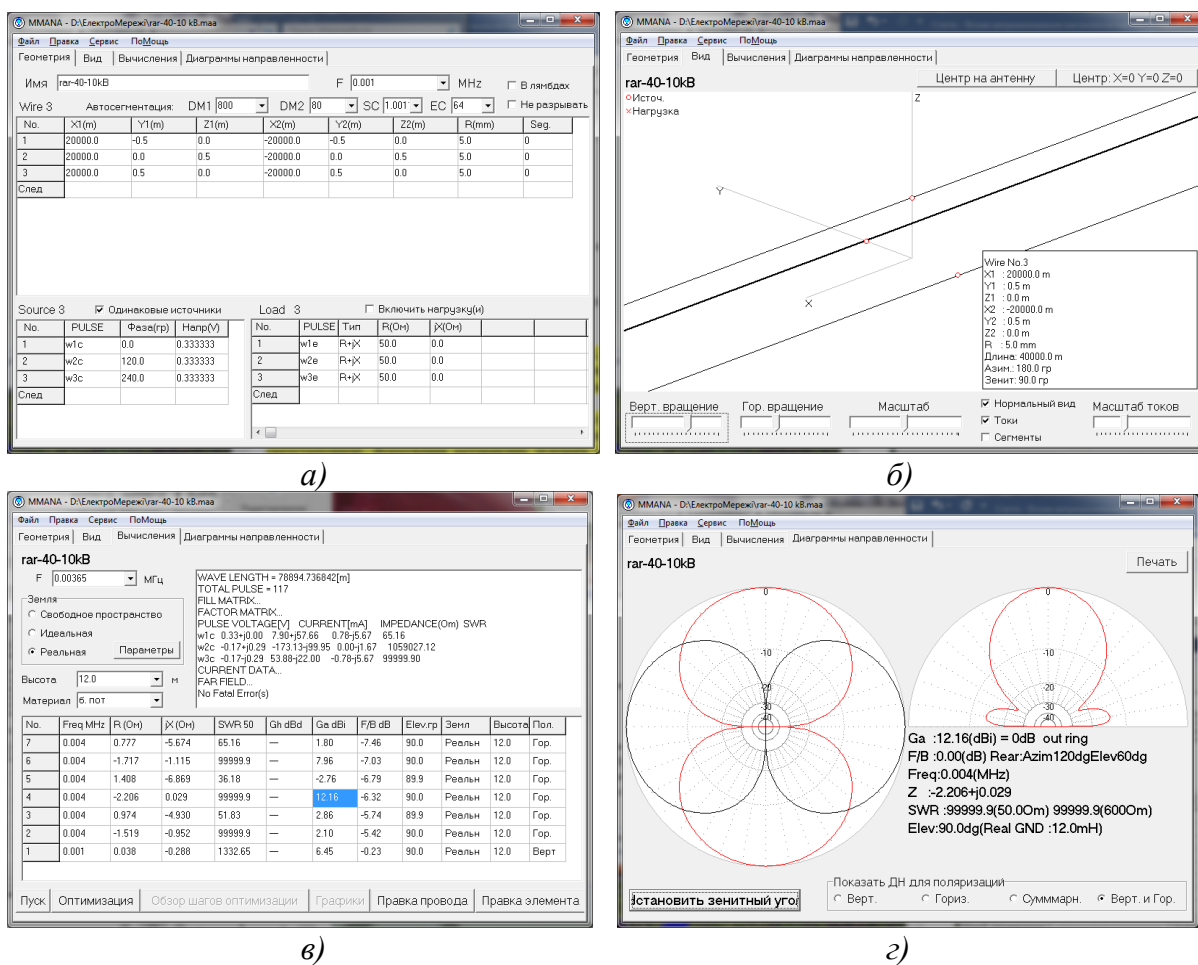


Рис. 1. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП середнього класу напруги 10 кВ

На рис. 2 наведено модель повітряної ЛЕП середнього класу напруги 35 кВ та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

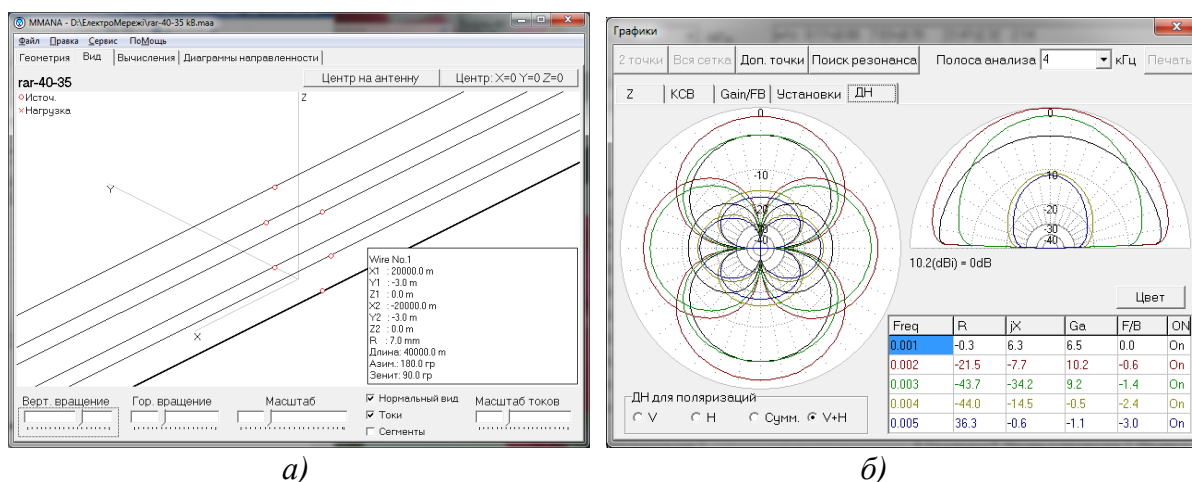


Рис. 2. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП середнього класу напруги 35 кВ

На рис. 3 показано модель повітряної ЛЕП високого класу напруги 110 кВ та результати моделювання її параметрів у смузі частот від 2 кГц до 3 кГц.

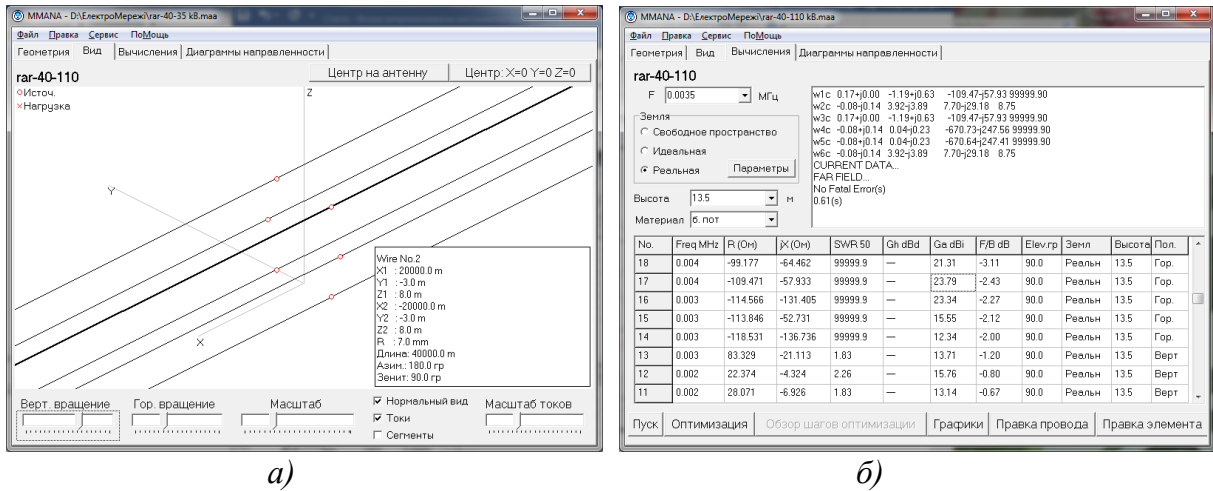


Рис. 3. Результати моделювання параметрів антени повітряної ЛЕП високого класу напруги 110 кВ

На рис. 4 зображено модель повітряної ЛЕП високого класу напруги 220 кВ та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

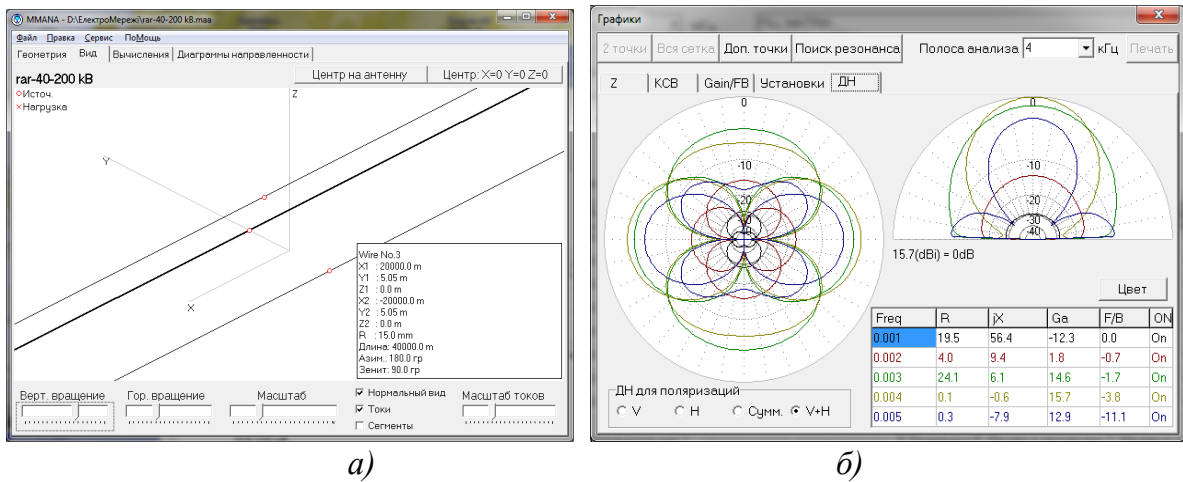


Рис. 4. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП високого класу напруги 220 кВ

На рис. 5 наведено модель повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1а [2]) та результати моделювання її параметрів у смузі частот від 3 кГц до 4 кГц.

На рис. 6 показано модель повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1б [2]) та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

На рис. 7 наведено модель повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 550 кВ (конструкція опор рис. 1б [2]) та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

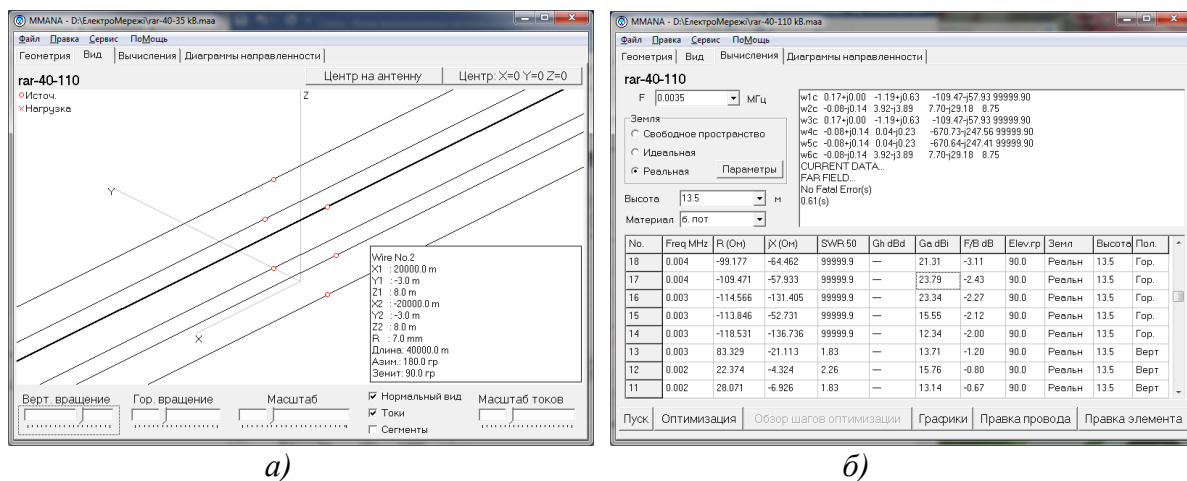


Рис. 5. Результати моделювання параметрів антени повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1а [2])

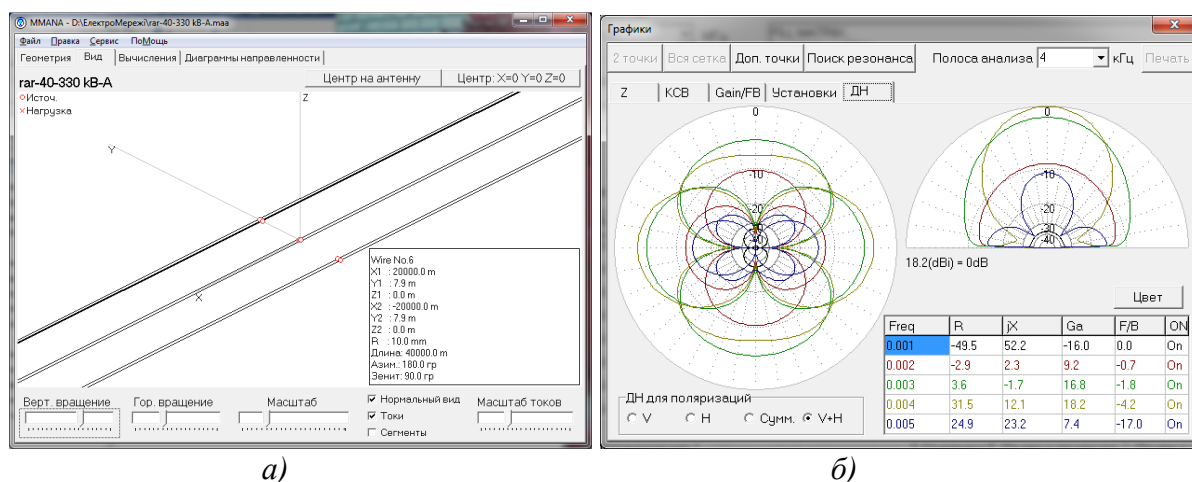


Рис. 6. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1б [2])

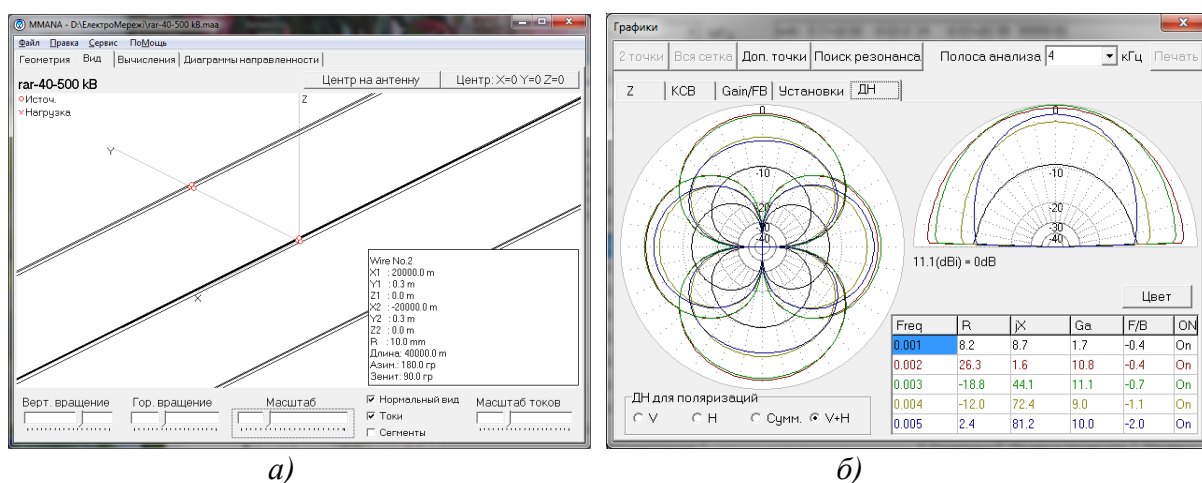


Рис. 7. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 550 кВ (конструкція опор рис. 1б [2])

На рис. 8 зображено модель повітряної ЛЕП ультрависокого класу напруги 750 кВ (конструкція опор рис. 1б [2]) та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

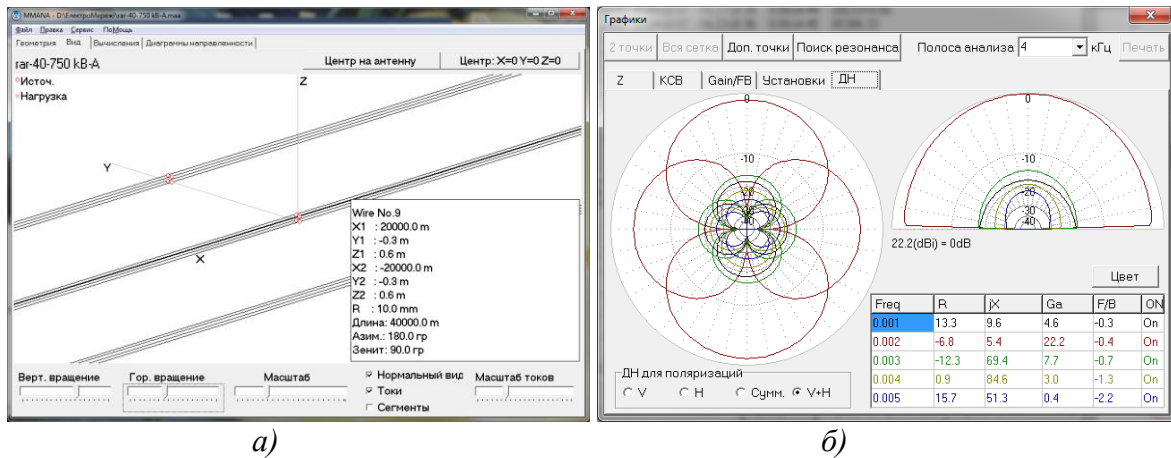


Рис. 8. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП ультрависокого класу напруги 750 кВ (конструкція опор рис. 1б [2])

Зведені результати чисельного моделювання повітряних ЛЕП різних класів за напругою та конструкцій опор, а також зміни коефіцієнта підсилення в смузі частот наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати чисельного моделювання параметрів повітряних ЛЕП різних класів за напругою та конструкцій опор

Клас моделей повітряних ЛЕП	Параметри			
	$(G_{\min} \dots G_{\max})$, дБі	$(f_{\min} \dots f_{\max})$, кГц	G_{\max} , дБі	f_{\max} , кГц
Середній				
10 кВ	6,45...12,16	1...4	12,16	4
35 кВ	18,29...-1,1	1...5	18,29	4
Високий				
110 кВ	12,34...23,79	2...4	23,79	4
220 кВ	-12,3...17,9	1...5	17,13	4
Надвисокий				
330 кВ (рис. 1а) [2]	7,37...32,69	3...4	32,69	3
330 кВ (рис. 1б) [2]	-16...7,4	1...5	45,7	3
500 кВ (рис. 1б) [2]	1,7...10	1...5	11,1	3
Ультрависокий				
750 кВ (рис. 1б) [2]	4,6...0,4	1...5	25,89	2

Отже, результати чисельного моделювання не суперечать результатам аналітичного методу дослідження [2] – теорії електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

ДС горизонтального ЕЕВ має пелюстковий характер із певною глибиною провалів залежно від параметрів Землі та її поверхні. Уздовж земної поверхні випромінювання відсутнє.

Явище інтерференції впливає на зміну коефіцієнта підсилення залежно від частоти та висоти встановлення антени. Також має значення клас моделі повітряної лінії та її геометричні розміри.

Відповідно до результатів моделювання, наведених в табл. 1, максимальний коефіцієнт підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ЛЕП буде на частоті 4 кГц для середнього та високого, на частоті 3 кГц для надвисокого й ультрависокого класів за напругою.

На краях смуги частот від 1 кГц до 5 кГц коефіцієнт підсилення має мінімальні значення, посередині – максимальні.

Значення коефіцієнта підсилення за зміни частоти на 50 Гц від 3 кГц до 4 кГц (рис. 1) більше 2 дБі, однак є одне максимальне 12,16 дБі та мінімальне -2,7 дБі.

Отже, у результаті проведеного аналітичним [2] та числовим методами часткового якісного дослідження впливу випромінювання високовольтних ЛЕП на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, запропонований в [1], можна зробити такі висновки.

1. Чим більший коефіцієнт підсилення передавальної антени на певних частотах гармонічного випромінювання електромереж PLNR, тим більше значення потужності на вході та виході приймальної антени на цих частотах та їх гармоніках.

2. В [1] зазначено, що необхідна для реєстрації мультиплетів інтенсивність ліній PLNR досягається, зокрема, за рахунок одного із трьох факторів – значної об'ємної густини енергії поля електромереж. Зміну густини енергії поля електромереж було досліджено аналітичним методом (розрахунок амплітуд напруженостей електричного поля в іоносфері на різних висотах) [2] та чисельного моделювання (дослідження зміни коефіцієнта підсилення у відповідній смузі частот).

3. У режимі детектора випромінювання мереж – високої об'ємної густини енергії їх поля виникають мультиплети зі значною кількістю сателітів (до десяти і більше) з інтервалом 50 Гц [1]. Цю особливість якісно підтверджено зміною коефіцієнта підсилення при зміні частоти на 50 Гц, який приймає достатньо великі значення.

4. За низької густини енергії поля електромереж та високих концентрацій вільних електронів можливий режим генерації нового електромагнітного поля, що пояснює можливість утворення мультиплетів з інтервалом 100 Гц між лініями [1]. Вказана особливість якісно підтверджена значеннями коефіцієнта підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ЛЕП на частотах, кратних 100 Гц, які не менше 2 дБі.

5. Достовірність отриманих даних в аналітичному методі підтверджується збігом основних виразів за одиницями вимірювання.

6. Точність числового методу обумовлена максимальною кількістю точок розрахунку в програмі MANNA – 8192 [16], що дозволяє отримати достатній збіг із практичними результатами [16].

Висновки. У результаті дослідження змодельовано вплив випромінювання високовольтних ЛЕП на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері

Наукова новизна полягає в якісному поясненні причини зміни інтенсивності ліній PLNR через зміну коефіцієнта підсилення високовольтних ЛЕП, які розглянуто як антенну

систему, що складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним ЕЕВ, які підняті за допомогою опор над землею поверхнею.

Практичну цінність підтверджено можливістю застосування запропонованого підходу для дослідження ефекту PLHR як одного з проявів взаємодії електромагнітного поля з частково іонізованою плазмою.

Перспективою подальших досліджень є чисельне моделювання зміни коефіцієнта підсилення в смузі частот із кроком 100 Гц за умов дослідження [4] та якісного порівняння результатів зі спектром з інтервалом між сателітами 100 Гц, який отримано на ШСЗ “Деметер” [4].

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Ваврух М., Корепанов В. Механізм формування ліній гармонічного випромінювання в іоносфері // Вісник Львівського ун-ту. 2013. Вип. 48. С. 180–197. ISSN 1024-588X.
2. Рихальський О. Р., Каращук Н. М., Нетребко Р. В. Аналітичне дослідження впливу випромінювання високовольтних ліній електропередач на формування гармонічного випромінювання в іоносфері // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 26 (I). С. 81–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.07>
3. Випромінювання ліній електропередач у навколосемному просторі / Д. Ф. Дудкін, В. О. Проненко, В. Є. Корепанов, С. І. Клімов // Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20, № 5. С. 27–34. ISSN 1561-8889. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.07>
4. Comparison of Magnetospheric Line Radiation and Power Line Harmonic Radiation: A Systematic Survey Using the DEMETER Spacecraft / F. Nemeц, O. Santolic, M. Parrot, J. Berthelier // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. P. A04301. <https://doi.org/10.1029/2006ja012134>
5. Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere / F. Nemeц, O. Santolic, M. Parrot, J. Bortnik // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. P. A08317. <https://doi.org/10.1029/2008ja013184>
6. Nemeц F., Parrot M., Santolic O. Influence of Power Line Harmonic Radiation on the VLF Wave Activity in the Upper Ionosphere: Is it Capable to Trigger New Emissions // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. A11301. <https://doi.org/10.1029/2010JA015718>
7. Barbe K., Pintelon R., Schoukens J. Welch Method Revisited: Nonparametric Power Spectrum Estimation Via Circular Overlap // IEEE Trans. Signal Process. 2010. № 58. P. 553–565.
8. Zelenyj L. M., Gurevich A. V., Klimov S. I. Academic Microsatellite CHIBIS-M // Space Research. 2014. Vol. 1, Iss. 1. P. 52.
9. Simoes F., Pfaff R., Freudenreich H. Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth’s Ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2011. № 38. P. L22101. <https://doi.org/10.1029/2011GL049668>
10. Francisco C. M. Connecting Renewable Power Plant to the Brazilian Transmission Power System. Washington, DC (USA), The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program. 2012. 37 p.

11. Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем / К. Б. Денисевич (Ч. 2), Ю. О. Ландау (Вступ, ч. 1, розділ 1, післямова), В. О. Нейман (Ч. 2), В. М. Сулейманов (Ч. 2). URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4> (дата звернення 20.04.2025).
12. Все про програму ММАНА. URL: <https://coollib.cc/b/703491-igor-viktorovich-goncharenko-kompyuternoe-modelirovanie-antenn-vse-o-programme-mmana/read> (дата звернення: 20.04.2025).
13. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Основи теорії електромагнітного поля : підруч. для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2009. 286 с.
14. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль : підруч. для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2010. 435 с.
15. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль : навч. посіб. для студентів напряму підготовки 6.050903 «Телекомунікації». Київ : Нац. техніч. ун-т України «КПІ», 2014. 336 с.
16. Кривуци В. Г. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу : навч. посіб. Київ : ДУІКТ, 2012. 596 с.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2025.

REFERENCES

1. Vavrukh, M., & Korepanov, V. (2013). Mekhanizm formuvannia linii harmonichnoho vyprominiuvannia v ionosferi [Mechanism of Formation of Harmonic Radiation Lines in the Ionosphere]. *Visnyk Lvivskoho un-tu [Bulletin of Lviv University. The series is physical]*, 48, 180–197. ISSN 1024-588X. [in Ukrainian].
2. Rykhalskyi, O. R., Karashchuk, N. M., & Netrobko, R. V. (2024). Analitichne doslidzhennia vplyvu vyprominiuvannia vysokovoltnykh linii elektroperedach na formuvannia harmonichnoho vyprominiuvannia v ionosferi [Analytical Study of the Influence of the Radiation of High-Voltage Power Lines on the Formation of Harmonic Radiation in the Ionosphere]. *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), 81–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.07> [in Ukrainian].
3. Dudkin, D. F., Pronenko, V. O., Korepanov, V. Ye., & Klimov, S.I. (2014). Vyprominiuvannia linii elektroperedach u navkolozemnomu prostori [Power Line Radiation in the Near-Earth Space]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space Science and Technology]*, 20, 5, 27–34. ISSN 1561-8889. <https://doi.org/10.15407/knit2014.05.027> [in Ukrainian].
4. Nemes, F., Santolic, O., Parrot, M., & Berthelier, J. (2007). Comparison of Magnetospheric Line Radiation and Power Line Harmonic Radiation: A Systematic Survey Using the DEMETER Spacecraft. *J. Geophys. Res.*, 112, A04301. <https://doi.org/10.1029/2006ja012134>
5. Nemes, F., Santolic, O., Parrot, M., & Bortnik, J. (2008). Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 113, A08317. <https://doi.org/10.1029/2008ja013184>

6. Nemeč, F., Parrot, M., & Santolik, O. (2010). Influence of Power Line Harmonic Radiation on the VLF Wave Activity in the Upper Ionosphere: Is it Capable to Trigger New Emissions. *J. Geophys. Res.*, 115, A11301. <https://doi.org/10.1029/2010JA015718>
7. Barbe, K., Pintelon, R., & Schoukens, J. (2010). Welch Method Revisited: Nonparametric Power Spectrum Estimation Via Circular Overlap. *IEEE Trans. Signal Process.*, 58, 553–565. <https://doi.org/10.1109/tsp.2009.2031724>
8. Zelenyj, L. M., Gurevich, A. V., & Klimov, S. I. (2014). Academic Microsatellite CHIBIS-M. *Space Research*, 1, 1, 52.
9. Simoes, F., Pfaff, R., & Freudenreich, H. (2011). Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth's Ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L22101. <https://doi.org/10.1029/2011GL049668>
10. Francisco, C. M. (2012). *Connecting Renewable Power Plant to the Brazilian Transmission Power System*. Washington, DC (USA), The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program.
11. Denysevych, K. B., Landau, Yu. O., Neiman, V. O., & Suleimanov, V. M. (n.d.). *Rozvytok atomnoi enerhetyky ta ob'iednanykh enerhosystem [Development of Nuclear Power and Integrated Energy Systems]*. Retrived from <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4> [in Ukrainian].
12. *Vse pro prohramu MMANA [All about the MMANA Program]*. (n.d.). Retrived from <https://coollib.cc/b/703491-igor-viktorovich-goncharenko-kompyuterno-modelirovanie-antenn-vse-o-programme-mmana/read> [in Ukrainian].
13. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2009). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 1. Osnovy teorii elektromahnitnoho polia [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 1. Fundamentals of the Theory of the Electromagnetic Field]*. Kharkiv [in Ukrainian].
14. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2010). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia elektromahnitnykh khvyl [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 2. Radiation and Propagation of Electromagnetic Waves]*. Kharkiv [in Ukrainian].
15. Pilinskyi, V. V. (2014). *Tekhnichna elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl [Technical Electrodynamics and Propagation of Radio Waves]*. Kyiv [in Ukrainian].
16. Kryvutsy, V. H. (2012). *Teoriia i praktyka upravlinnia vykorystanniam radiochastotnoho resursu [Theory and Practice of Management of Radio Frequency Resource Use]*. Kyiv [in Ukrainian].

O. R. Ryhalsky, S. V. Petrash, A. V. Antonyuk

MODELING OF ANTENNA SYSTEMS FROM HIGH-VOLTAGE POWER LINES TO INVESTIGATE THE INFLUENCE OF THEIR RADIATION ON THE FORMATION OF PLHR RADIATION IN THE IONOSPHERE

Satellite research has revealed the effect of power line harmonic radiation (PLHR) reflection in the ionosphere. It has been established that powerful consumers of electricity generate technogenic signals at frequencies related to the frequency of the power grid and its

harmonics. They cause changes in the parameters of the plasma and the electromagnetic field in the ionosphere. However, despite repeated attempts, there is no explanation for the PLHR effect to date.

The aim of the article is a partial qualitative study using a numerical method of the influence of radiation from high-voltage power lines on the mechanism of formation of harmonic radiation in the ionosphere, based on the theories of the electromagnetic field, antennas, and the propagation of electromagnetic waves in the atmosphere.

High-voltage power lines are considered as an antenna system consisting of emitters equivalent to horizontal elementary electric vibrators, which are raised above the earth's surface by means of supports. The numerical method has been used to simulate overhead power lines of various classes and configurations as antenna systems in the MMANA software environment. In particular, the change in the gain of antenna systems of the corresponding models of overhead power lines in the frequency band of harmonic radiation of PLHR power networks. The directivity diagram of a horizontal elementary electric vibrator has a petal-like character with a certain depth of dips depending on the parameters of the Earth and its surface, along which radiation is absent. The phenomenon of interference affects the change in the gain depending on the frequency and height of the antenna installation. The class of the overhead line model and its geometric dimensions also matter.

Numerical modeling does not contradict the conclusions of the analytical research method – the theory of the electromagnetic field, antennas, and the propagation of electromagnetic waves in the atmosphere.

The intensity of PLHR lines necessary for registering multiplets is achieved, in particular, due to the significant volumetric energy density of the power grid field, the change of which was studied by numerical modeling (analysis of the change in the gain of antenna systems of the corresponding models of overhead power lines in a certain frequency band). In the case of high volumetric energy density of the electric grid field, multiplets with a large number of satellites (up to ten or more) with an interval of 50 Hz arise. This feature is qualitatively confirmed by the change in the gain coefficient with frequency changes of 50 Hz, which takes on sufficiently large values. In the case of low energy density of the electric grid field and high concentrations of free electrons, a new electromagnetic field generation mode is possible, which explains the possibility of the formation of multiplets with an interval of 100 Hz between lines. This feature is qualitatively confirmed by the values of the gain at frequencies multiples of 100 Hz, which are not less than 2 dBi.

Keywords: radiation of electric networks; elementary electric vibrator; directional diagram; electric field strength; magnetic field strength; ionosphere; ionosphere radiation.

С. В. Тимчук, В. О. Тарасенко, О. П. Радущинський

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СПЕКТРОГРАМ РАДІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ЇХ РОЗПІЗНАВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Автоматичне розпізнавання радіосигналів за допомогою згорткових нейронних мереж, що аналізують їх спектрограми, є перспективним напрямом, однак на його ефективність впливає відсутність стандартизованих параметрів формування цих спектрограм, необхідних для забезпечення їх інформативності. У зв'язку із цим було розроблено методику визначення найбільш прийнятних параметрів генерації спектрограм короткохвильових сигналів у середовищі Adobe Audition на основі експертних оцінок, яка дозволяє створити стандартизований датасет для навчання згорткових нейронних мереж.

Проведено експеримент за участю досвідчених операторів радіоелектронної розвідки, які індивідуально налаштовували параметри візуалізації спектрограми (розмір швидкого перетворення Фур'є, тип віконної функції, динамічний діапазон, колірна схема, тривалість сегмента) для двох типових короткохвильових сигналів до досягнення максимальної візуальної інформативності. Зібрані дані аналізувалися статистично (мода, середнє) для визначення узагальнених рекомендацій.

Визначено єдиний рекомендований набір параметрів генерації спектрограм (розмір швидкого перетворення Фур'є, тип віконної функції, колірна схема, динамічний діапазон, тривалість сегмента), який відображає консенсус експертів щодо оптимального візуального подання аналізованих сигналів. Запропонована методика та отримані рекомендації дозволяють стандартизувати процес підготовки спектрограм короткохвильових сигналів для завдань автоматичного розпізнавання за допомогою згорткових нейронних мереж, сприяють формуванню якісних датасетів та підвищенню відтворюваності досліджень.

Сформовані параметри можуть бути використані як основа для створення однорідних спектрограм у рамках побудови навчальних вибірок. Узгодженість візуальних характеристик забезпечує єдиний підхід до формування вхідних даних, що відповідає вимогам стандартизації в системах машинного навчання, орієнтованих на оброблення радіосигналів.

Ключові слова: *спектрограма; згорткові нейронні мережі; короткохвильовий діапазон; експертна оцінка; параметри візуалізації; метод комп'ютерного зору; Adobe Audition.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Аналіз радіосигналів у короткохвильовому (КХ) діапазоні залишається актуальним та важливим завданням у багатьох прикладних галузях, таких як: радіозв'язок, радіомоніторинг та радіоелектронна розвідка. Традиційно

© С. В. Тимчук, В. О. Тарасенко, О. П. Радущинський, 2025

одним з основних методів ідентифікації та класифікації невідомих або складних КХ сигналів є аналіз їхніх спектрально-часових візуалізацій, який виконується досвідченими операторами.

Зі стрімким розвитком технологій штучного інтелекту, зокрема методів глибокого навчання та згорткових нейронних мереж (CNN), з'являються нові перспективи для автоматизації процесу розпізнавання сигналів. Застосування CNN до аналізу зображень спектрограм дозволяє створювати системи, здатні автоматично класифікувати типи сигналів. Однак успішність такого підходу критично залежить від якості та способу подання вхідних даних – самих зображень спектрограм.

Відомо, що параметри, які використовуються для обчислення та візуалізації спектрограми (наприклад, розмір швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), тип віконної функції, обраний динамічний діапазон, колірна схема візуалізації), значно впливають на кінцевий вигляд зображення. Різні налаштування можуть підкреслювати або приховувати важливі для розпізнавання характеристики сигналу. На сьогодні практично відсутні стандартизовані методики або загальноприйняті рекомендації щодо вибору оптимального набору цих параметрів у ході підготовки спектрограм саме для завдань їх подальшого автоматизованого оброблення та розпізнавання за допомогою CNN. Ця невизначеність ускладнює розроблення надійних автоматизованих систем, порівняння результатів різних досліджень та забезпечення відтворюваності експериментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні підходи до автоматизованого аналізу радіосигналів усе частіше ґрунтуються на методах глибокого навчання, зокрема CNN, для оброблення їх спектрально-часових візуалізацій [6–9]. Особливо перспективним є застосування CNN до двовимірних спектрограм сигналів, які розглядаються як зображення для завдань класифікації та виявлення. Успішність такого підходу була продемонстрована в дослідженнях, пов'язаних з аналізом радіоастрономічних даних. Наприклад, у роботах [2, 5] CNN (зокрема архітектури типу Wide Residual Networks) були ефективно застосовані для класифікації різних типів модельованих радіосигналів за їхніми спектрограмами. Аналогічно в [4] CNN використовувалися для локалізації вузькосмугових сигналів на синтетичних спектрограмах в умовах сильних завад. Відомі також підходи [3], де глибоке навчання сприяє аналізу безпосередньо часових відліків радіосигналу для спільного детектування та класифікації модуляції.

Однак у ході детального розгляду зазначених робіт [2–5], що стосуються застосування глибокого навчання до радіосигналів, виявлено важливий аспект, якому не приділялося достатньо уваги. Це питання вибору та обґрунтування параметрів візуалізації для самих спектрограм (розмір ШПФ, тип віконної функції, динамічний діапазон), що використовуються як вхідні дані для CNN у [2, 4, 5], зазвичай вони не є основним фокусом досліджень. Ці параметри часто вибираються емпірично, на основі попереднього досвіду або специфіки моделювання, без систематичного аналізу їх впливу на якість розпізнавання системою CNN та, що є критичним для практичних застосувань, на візуальну інформативність для експерта в задачах радіомоніторингу КХ діапазону [10]. Така відсутність обґрунтованої методики вибору оптимальних параметрів спектрограм ускладнює створення надійних автоматизованих систем розпізнавання та порівняння

результатів різних досліджень. Саме тому стаття спрямована на заповнення цієї прогалини шляхом розроблення методики визначення оптимальних параметрів спектрограм на основі експертних оцінок.

Формулювання завдання дослідження. Через виявлену відсутність стандартизованих підходів до підготовки спектрограм КХ сигналів для їх ефективного автоматичного розпізнавання за допомогою CNN маємо нагальну необхідність у розробленні відповідної методики, яка б урахувала специфіку візуального сприйняття таких даних експертами. Тому метою цієї публікації є визначення та обґрунтування оптимального набору параметрів для генерації спектрограм КХ сигналів за допомогою програмного забезпечення Adobe Audition на основі методу експертних оцінок. Це, у свою чергу, передбачає проведення експерименту, у ході якого група кваліфікованих експертів суб'єктивно налаштовує параметри візуалізації (розмір ШПФ, тип віконної функції, динамічний діапазон, колірна схема) для двох типових КХ сигналів: STANAG 4285_TFC (далі – STANAG) і Чайка_ЧМ2-500_150 (далі – Чайка) – до стану найкращої інформативності для ідентифікації. Важливим етапом є збір та систематизація даних щодо обраних експертами параметрів. Подальший їх аналіз із застосуванням відповідних статистичних методів (визначення моди для категорійних та середнього значення для числових параметрів) дозволить вивести узагальнені рекомендовані значення. У підсумку дослідження спрямоване на формулювання науково обґрунтованих практичних рекомендацій щодо налаштувань Adobe Audition, які дозволять готувати якісні та консистентні зображення спектрограм для формування навчальних датасетів, призначених для подальшого використання в системах розпізнавання на основі CNN.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети дослідження, а саме визначення найбільш прийнятних параметрів генерації спектрограм КХ сигналів для подальшого використання в системах автоматичного розпізнавання на базі CNN, було проведено експеримент із використанням методу експертних оцінок.

В експерименті взяли участь 10 фахівців, кожен з яких має досвід практичної роботи оператором радіоелектронної розвідки понад три роки та володіє навичками візуального аналізу спектрограм КХ сигналів.

Експертам були надані для аналізу записи двох типових сигналів КХ діапазону: STANAG та Чайка. Важливо зазначити, що вихідні файли сигналів характеризувалися обмеженою смугою пропускання в 4 кГц. Експеримент проводився з використанням лише програмного забезпечення Adobe Audition (стандартний функціонал для роботи зі спектрограмами, без прив'язки до конкретної версії), інше не застосовувалося. Початковий вигляд робочого вікна програми для сигналів Чайка та STANAG із налаштуваннями за замовчуванням (розмір ШПФ 2048, вікно Blackman-Harris, діапазон 96 дБ), із якими починали працювати експерти, показано на рис. 1–2 відповідно.

Кожен експерт послідовно працював з обома наданими сигналами. Головне завдання полягало в тому, щоб для усіх сигналів індивідуально підібрати такі налаштування параметрів спектрограми в Adobe Audition, які б забезпечували найкращу, на суб'єктивну думку експерта, візуальну чіткість та інформативність для ідентифікації типу сигналу.

Параметри, що підлягали налаштуванню, включали: розмір ШПФ (FFT Size), тип віконної функції (Window Function), динамічний діапазон (Dynamic Range, dB) та колірну схему (Color Scheme).

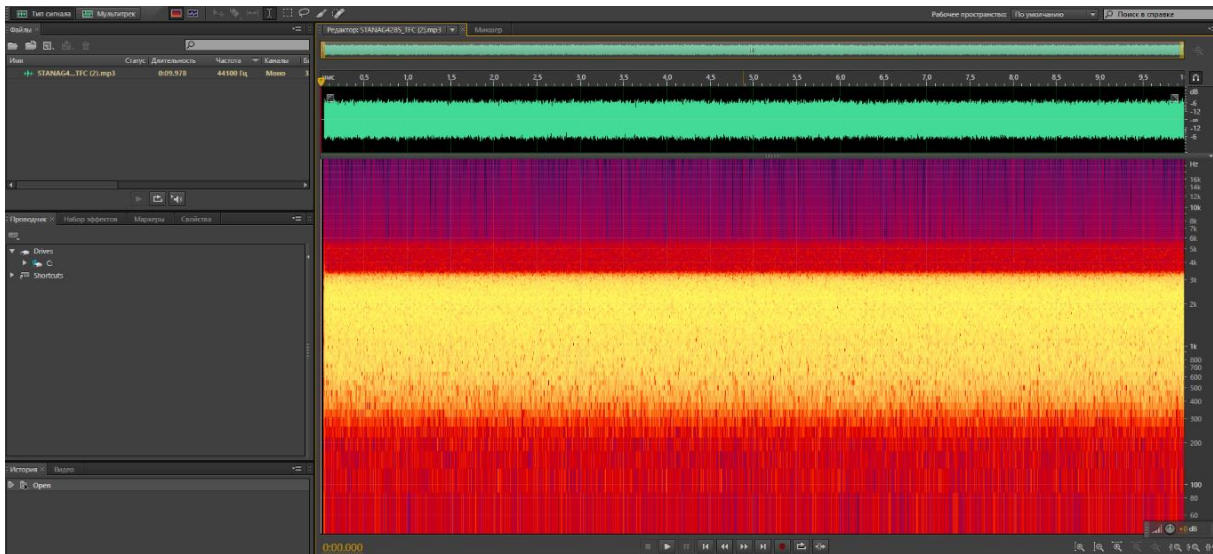


Рис. 1. Початковий вигляд робочого вікна програми для сигналу STANAG

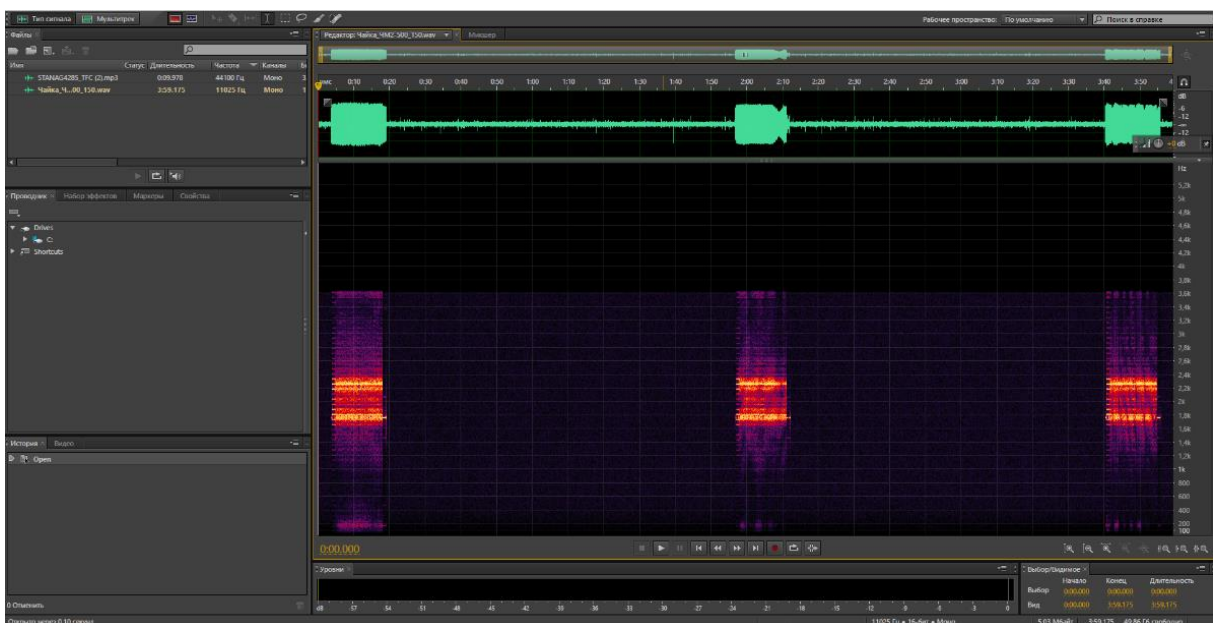


Рис. 2. Початковий вигляд робочого вікна програми для сигналу Chauka

Окремим завданням експертів було визначення мінімально необхідної тривалості фрагмента сигналу, достатньої для його впевненої ідентифікації за обраних налаштувань спектрограми. Для цього вони використовували масштабування часової осі та оцінювали інформативність різних за довжиною відрізків.

Після того, як експерт зупинявся на оптимальному, на його думку, наборі параметрів для певного сигналу, ці значення параметрів фіксувалися. Процедура повторювалася для обох сигналів кожним із 10 експертів. Зібрані дані були зведені в табл. 1–2, що містять по 10 наборів параметрів для кожного з двох типів сигналів.

Таблиця 1

Узагальнені результати експертного визначення параметрів спектрограм
для сигналу STANAG

Номер експерта	Розмір ШПФ	Віконна функція	Динамічний діапазон (дБ)	Колірна схема	Тривалість запису сигналу (с)
1	1024	Хеммінга	60	За замовчуванням	8
2	2084	Хеммінга	80	За замовчуванням	10
3	512	Хеммінга	80	За замовчуванням	4
4	1024	Ханна	90	Розширена	6
5	1024	Прямокутна	60	За замовчуванням	7
6	1024	Хеммінга	80	За замовчуванням	5
7	1024	Хеммінга	80	За замовчуванням	5
8	2048	Ханна	90	Розширена	9
9	512	Хеммінга	60	За замовчуванням	4
10	1024	Хеммінга	70	За замовчуванням	5

Таблиця 2

Узагальнені результати експертного визначення параметрів спектрограм
для сигналу Чайка

Номер експерта	Розмір ШПФ	Віконна функція	Динамічний діапазон (дБ)	Колірна схема	Тривалість запису сигналу (с)
1	512	Хеммінга	70	За замовчуванням	7
2	2084	Хеммінга	80	За замовчуванням	9
3	1024	Хеммінга	70	За замовчуванням	5
4	1024	Ханна	80	Розширена	7
5	1024	Прямокутна	70	За замовчуванням	7
6	2048	Хеммінга	60	За замовчуванням	5
7	1024	Хеммінга	70	За замовчуванням	6
8	1024	Ханна	80	Розширена	8
9	512	Хеммінга	60	За замовчуванням	4
10	1024	Хеммінга	70	За замовчуванням	5

Зібрані дані щодо обраних 10 експертами параметрів спектрограм для сигналів STANAG та Чайка було статистично проаналізовано з метою визначення узагальнених рекомендованих значень для формування стандартизованого датасету. Аналіз проводився окремо для кожного типу сигналу, після чого результати узагальнювалися для отримання єдиного набору рекомендацій.

Для таких категорійних параметрів, як: тип віконної функції, колірна схема, розмір ШПФ (що приймав значення 512, 1024 або 2048), – визначався найчастіше вибраний варіант експертами для кожного сигналу окремо шляхом розрахунку моди розподілу відповідей.

Для числових параметрів: динамічний діапазон (дБ) та тривалість аналізованого сегмента (с) – для кожного сигналу розраховувалися середні арифметичні значення (η) за формулою (1) та стандартні відхилення (σ) за формулою (2) за вибіркою з $n = 10$ експертних оцінок:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

де x_i – значення параметра, надане експертом;
 n – кількість експертів.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \eta)^2}, \quad (2)$$

де η – середнє арифметичне значення;
 x_i – значення параметра від i -го експерта;
 n – загальна кількість оцінок.

З метою отримання єдиного рекомендованого набору параметрів, який був би прийнятним для підготовки спектрограм різних типів сигналів у межах КХ діапазону, було застосовано підхід усереднення результатів, отриманих для двох досліджуваних сигналів.

Для числових параметрів (динамічний діапазон, тривалість сегмента) фінальне рекомендоване значення ($\mu_{рек}$) отримано як середнє арифметичне від середніх значень (μ_1 та μ_2), розрахованих за формулою (1) окремо для сигналів STANAG (сигнал 1) та Чаука (сигнал 2), згідно з виразом (3):

$$\mu_{рек} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}, \quad (3)$$

де $\mu_{рек}$ – рекомбіноване (середнє об'єднане) значення;

μ_1 і μ_2 – середні значення двох окремих груп або умов.

Для категорійних параметрів (розмір ШПФ, тип віконної функції, колірна схема), оскільки модальні значення для обох сигналів збіглися за кожним із цих параметрів, як фінальна рекомендація обирався цей єдиний модальний варіант.

Використання усереднених значень як фінальних рекомендацій обґрунтовано необхідністю знайти практичний компроміс між потенційно різними оптимальними налаштуваннями для різних сигналів. Такий підхід дозволяє створити уніфікований та консистентний набір параметрів для генерації великого датасету спектрограм, що є важливим для навчання стабільних моделей CNN, здатних до узагальнення. Хоча такий усереднений підхід може бути неідеальним для кожного конкретного сигналу, він забезпечує стандартизацію та відтворюваність процесу підготовки даних.

Щодо фіксованої смуги пропускання 4 кГц для вхідних сигналів, використаних в експерименті, це було зумовлено типовою шириною каналів, що використовуються для передачі багатьох цифрових та аналогових сигналів у КХ діапазоні.

За результатами проведеного експерименту та застосування описаної вище методики аналізу були отримані узагальнені дані щодо уподобань експертів з-поміж параметрів

генерації спектрограм. Основні статистичні показники та фінальні рекомендовані значення параметрів наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Усереднення результатів двох сигналів

Параметр	Сигнал	Показник	Значення	Фінальна рекомендація
Розмір ШПФ	STANAG	Мода	1024 (6/10 експ.)	1024
	Chayka	Мода	1024 (6/10 експ.)	
Тип віконної функції	STANAG	Мода	Хеммінга (7/10 експ.)	Хеммінга
	Chayka	Мода	Хеммінга (7/10 експ.)	
Колірна схема	STANAG	Мода	За замовчуванням (8/10 експ.)	За замовчуванням
	Chayka	Мода	За замовчуванням (8/10 експ.)	
Динамічний діапазон (дБ)	STANAG	Середнє (μ) \pm Ст. відх. (σ)	75,0 \pm 11,8	73
	Chayka	Середнє (μ) \pm Ст. відх. (σ)	71,0 \pm 7,4	
Тривалість сегмента (с)	STANAG	Середнє (μ) \pm Ст. відх. (σ)	6,3 \pm 2,1	6
	Chayka	Середнє (μ) \pm Ст. відх. (σ)	6,3 \pm 1,6	

Аналіз результатів показує, що для всіх категорійних параметрів (розмір ШПФ, тип віконної функції, колірна схема) модальні значення, обрані експертами, збігаються для обох досліджуваних сигналів. Це свідчить про певну універсальність уподобань експертів щодо цих налаштувань. Найбільшу перевагу було віддано розміру ШПФ 1024, віконній функції Хеммінга та колірній схемі за замовчуванням (Default). Частота вибору цих модальних значень (6–8 з 10 експертів) вказують на значний рівень консенсусу.

Щодо числових параметрів, то середнє значення оптимального динамічного діапазону дещо відрізнялося для двох сигналів (75,0 дБ для STANAG проти 71,0 дБ для Chayka), причому спостерігався помітний розкид думок ($\sigma \approx 11,8$ та 7,4 дБ). Це може свідчити про те, що оптимальний динамічний діапазон може бути більш залежним від типу сигналу. Натомість середня оптимальна тривалість аналізованого сегмента виявилася однаковою (6,3 с) із відносно невеликим розкидом ($\sigma \approx 1,6$ –2,1 с), що вказує на високу узгодженість експертів у цьому питанні.

Відповідно до методики узагальнення фінальний рекомендований набір параметрів для генерації спектрограм КХ сигналів у середовищі Adobe Audition становить: розмір ШПФ – 1024; тип віконної функції – Хеммінга; колірна схема – за замовчуванням; динамічний діапазон – 73 дБ; тривалість аналізованого сегмента – 6 с.

Початковий вигляд робочого вікна програми Adobe Audition, із яким починали працювати експерти, для сигналів Чайка та STANAG показано на рис. 1–2 відповідно. Приклади спектрограм цих сигналів із використанням визначених рекомендованих параметрів наведено на рис. 3.

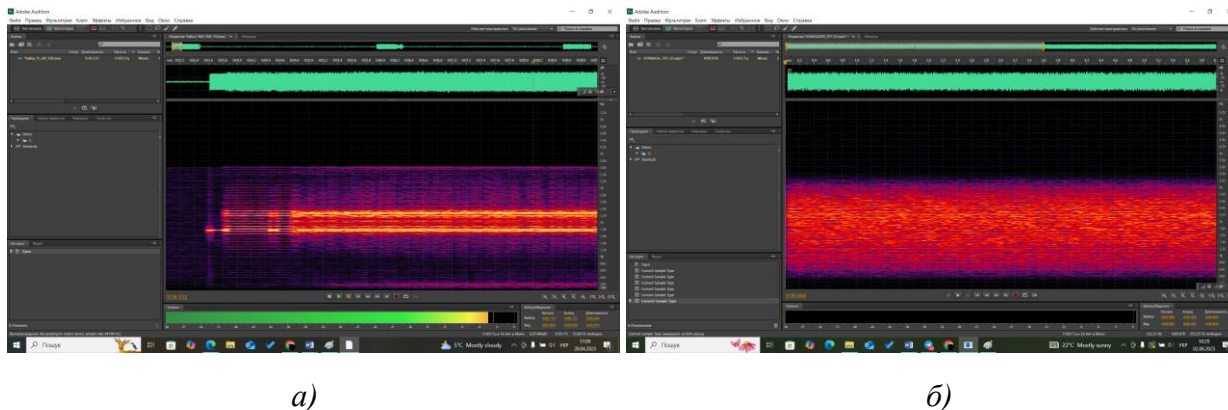


Рис. 3. Кінцевий вигляд робочого вікна програми для сигналів: а) Чайка; б) STANAG

Висновки

У статті запропоновано розв'язання актуальної проблеми відсутності стандартизованого підходу до вибору параметрів генерації спектрограм КХ сигналів, призначених для подальшого автоматизованого аналізу за допомогою згорткових нейронних мереж. Метою дослідження було розроблення методики визначення найбільш прийнятних параметрів візуалізації спектрограм на основі експертних оцінок фахівців із радіомоніторингу.

У результаті проведеного експерименту за участю 10 досвідчених операторів радіоелектронної розвідки та статистичного аналізу їхніх уподобань щодо налаштувань спектрограм для двох типових КХ сигналів (STANAG та Чайка) у середовищі Adobe Audition було визначено такий рекомендований набір параметрів: розмір ШПФ – 1024, тип віконної функції – Хеммінга, колірна схема – за замовчуванням, динамічний діапазон – 73 дБ, мінімально необхідна тривалість аналізованого сегмента – 6 с. Вони відображають колективний експертний консенсус щодо налаштувань, які забезпечують найкращий компроміс між візуальною чіткістю, а інформативністю спектрограм для ідентифікації сигналів.

Отримані результати мають практичне значення, оскільки демонструють науково обґрунтований підхід до стандартизації процесу підготовки вхідних даних для систем автоматичного розпізнавання КХ сигналів на основі CNN. Використання рекомендованих параметрів може сприяти покращенню якості та узгодженості датасетів спектрограм, підвищенню відтворюваності досліджень у цій галузі, а потенційно – покращенню точності роботи самих нейромережевих класифікаторів.

Слід зауважити про певні обмеження проведеного дослідження, зокрема суб'єктивний характер експертних оцінок, відносно невелику кількість залучених експертів (10 осіб) та типів сигналів (два види), використання специфічного програмного забезпечення (Adobe Audition) та роботу із сигналами в смузі 4 кГц.

Перспективними напрямками подальших досліджень є: валідація ефективності запропонованих параметрів шляхом безпосереднього навчання та тестування CNN на датасеті, згенерованому із цими налаштуваннями; розширення експерименту на більшу кількість типів КХ сигналів та експертів; дослідження впливу інших параметрів спектрограми (наприклад, відсотка перекриття вікон); порівняння результатів експертної оцінки з методами автоматичної оптимізації параметрів.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Baran R., Rusc T., Fornalski P. A Smart Camera for the Surveillance of Vehicles in Intelligent Transportation Systems // *Multimedia Tools and Applications*. 2016. Т. 75, С. 10471–10493. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3151-y>
2. Вовк С., Гнатушенко В., Бондаренко М. Методи обробки зображень та комп'ютерний зір. Дніпропетровськ : ЛІРА, 2016. 147 с.
3. Woods R. E., Gonzalez R. C. *Digital Image Processing*. Pearson, 2017. 1192 p.
4. Слободянюк П. Довідник з радіомоніторингу. Ніжин : Аспект-Поліграф, 2008. 551 с.
5. Machine Vision and Deep Learning for Classification of Radio SETI Signals / G. R. Harp, J. Richards, S. Shostak et al. SETI Institute, NASA Ames, IBM, Team Effsubsee, 2023. 31 p.
6. Classification of Simulated Radio Signals Using Wide Residual Networks for Use in the Search for Extra-Terrestrial Intelligence / G. A. Cox, S. Egly, G. R. Harp et al. Mountain View, California, 2018. 16 p.
7. Narrow-Band Signal Localization for SETI on Noisy Synthetic Spectrogram Data / B. Brzycki, A. Siemion, S. Croft et al. // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2020. Vol. 132. P. 1–12. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/abaaf7>
8. Signal Detection and Automatic Modulation Classification via Deep Learning / H. Xing, X. Zhang, S. Chang et al. The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024. 39 p.
9. Forsyth D. A., Ponce J. *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson Education, 2015. 793 p.
10. Eleyan A., Bayram F., Eleyan G. Spectrogram-Based Arrhythmia Classification Using Three-Channel Deep Learning Model with Feature Fusion // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 21. P. 9936. <https://doi.org/10.3390/app14219936>
11. Davies E. R. *Computer Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. Elsevier Science & Technology Books, 2017. 900 p.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2025.

REFERENCES

1. Baran, R., Rusc, T., & Fornalski, P. (2016). A Smart Camera for the Surveillance of Vehicles in Intelligent Transportation Systems. *Multimedia Tools and Applications*, 75, 10471–10493. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3151-y>
2. Vovk, S., Hnatushenko, V., & Bondarenko, M. (2016). *Metody obrobky zobrazen ta komp'uterniy zir [Methods of Image Processing and Computer Vision]*. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].
3. Woods, R. E., & Gonzalez, R. C. (2017). *Digital Image Processing*. Pearson.
4. Slobodianiuk, P. (2008). *Dovidnyk z radiomonitorynhu [Handbook of Radio Monitoring]*.

Nizhyn [in Ukrainian].

5. Harp, G. R., Richards, J., & Shostak, S. et al. (2023). *Machine Vision and Deep Learning for Classification of Radio SETI Signals*. SETI Institute, NASA Ames, IBM, Team Effsubsee.
6. Cox, G. A., Egly, S., & Harp, G. R. et al. (2018). *Classification of Simulated Radio Signals Using Wide Residual Networks for Use in the Search for Extra-Terrestrial Intelligence*. Mountain View, California.
7. Brzycki, B., Siemion, A., & Croft, S. et al. (2020). Narrow-Band Signal Localization for SETI on Noisy Synthetic Spectrogram Data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132, 1–12. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/abaaf7>
8. Xing, H., Zhang, X., & Chang, S. et al. (2024). *Signal Detection and Automatic Modulation Classification via Deep Learning*. The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Beijing University of Posts and Telecommunications.
9. Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2015). *Computer Vision: A Modern Approach*. Pearson Education.
10. Eleyan, A., Bayram, F., & Eleyan, G. (2024). Spectrogram-Based Arrhythmia Classification Using Three-Channel Deep Learning Model with Feature Fusion. *Applied Sciences*, 14 (21), 9936. <https://doi.org/10.3390/app14219936>
11. Davies, E. R. (2017). *Computer Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*. Elsevier Science & Technology Books.

S. V. Tymchuk, V. O. Tarasenko, O. P. Radushynskiy

METHOD FOR DETERMINING SPECTROGRAM PARAMETERS OF RADIO SIGNALS FOR THEIR RECOGNITION USING COMPUTER VISION METHODS

Automatic recognition of radio signals using convolutional neural networks that analyze their spectrograms is a promising approach. However, its effectiveness is hindered by the lack of standardized parameters for generating these spectrograms, which are necessary to ensure their informativeness. To address this issue, a methodology was developed to determine the most suitable parameters for generating spectrograms of shortwave (high frequency) signals in the Adobe Audition environment based on expert evaluations. This approach enables the creation of a standardized dataset for training convolutional neural networks.

An experiment was conducted involving experienced signals intelligence operators who individually adjusted spectrogram visualization parameters (size of fast Fourier transform, window function type, dynamic range, color scheme, and segment duration) for two typical high frequency signal types to achieve maximum visual informativeness. The collected data were statistically analyzed (mode, mean) to derive generalized recommendations.

A unified recommended set of spectrogram generation parameters (size of fast Fourier transform, window function type, color scheme, dynamic range, and segment duration) was identified, reflecting expert consensus on the optimal visual representation of the analyzed signals. The proposed methodology and resulting recommendations allow for standardization of the spectrogram preparation process for high frequency signals in tasks of automatic recognition using convolutional neural networks, contributing to the development of high-quality datasets and improved reproducibility of research.

Keywords: *spectrogram; convolutional neural networks; high frequency band; expert evaluation; visualization parameters; computer vision method; Adobe Audition.*

О. Є. Сокульський, В. О. Чумакевич, Є. О. Топольськов

СТАН РОЗРОБЛЕННЯ Й ПЕРЕГЛЯДУ СТАНДАРТІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

У статті проаналізовано сучасні тенденції в сфері стандартизації процесів управління повним життєвим циклом складних зразків озброєння та військової техніки в Україні та країнах Європейського Союзу. Через переосмислення способів і методів застосування озброєння та військової техніки змінюються підходи до планування та управління стадіями життєвого циклу, тому ця тема є недостатньо дослідженою. Наведено терміни, визначення та скорочення щодо системи управління життєвим циклом, цілі застосування, основні положення, принципи управління життєвим циклом, його об'єкти та суб'єкти, а також розглянуто ієрархію нормативно-правових актів і нормативних документів системи управління життєвим циклом озброєння та військової техніки. Надано історичну довідку щодо етапів реформування системи стандартів із розроблення та впровадження у виробництво системи управління життєвим циклом озброєння та військової техніки. Описано типовий склад, призначення стадій життєвого циклу озброєння та військової техніки й критерії прийняття рішень про перехід між ними. Наведено основні документи Європейського Союзу, НАТО та розроблені національні стандарти з питань системи управління життєвим циклом озброєння та військової техніки. Розкрито сутність поняття управління (менеджмент) повним життєвим циклом озброєння та військової техніки й основні види діяльності з його реалізації. Проаналізовано наявність і достатність необхідних передумов для реформування чинної та створення на її базі нової системи управління життєвим циклом оборонної продукції за міжнародними стандартами. Показано, що нормативним базисом, який визначає політику та принципи управління життєвим циклом складних виробів і систем, є вітчизняні та міжнародні стандарти системної інженерії. Зроблено висновки та надано пропозиції щодо перспектив подальших досліджень.

Ключові слова: життєвий цикл озброєння та військової техніки; система управління життєвим циклом; об'єкти та суб'єкти управління життєвим циклом; інтегрована логістична підтримка продукції; менеджмент; штучний інтелект.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сучасному етапі розвитку та вдосконалення оборонного сектору в різних країнах світу значна увага приділяється актуальним проблемам удосконалення методології управління повним життєвим циклом (ЖЦ) складних і високотехнологічних зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), за якого управління ЖЦ (УЖЦ) окремих зразків ОВТ є взаємоузгодженим і синхронізованим із динамікою змін військово-політичної, економічної, екологічної та навіть кліматичної обстановки у світі, а також необхідністю мати військові спроможності, здатні забезпечити гнучкість, адаптивність, стійкість до нових викликів і загроз, зокрема й гібридних.

© О. Є. Сокульський, В. О. Чумакевич, Є. О. Топольськов, 2025

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день відбувається зміна національних стандартів не лише щодо системи УЖЦ (СУЖЦ), а й способів і методів застосування ОВТ. Через ці обставини зустрічається вкрай мало публікацій, які б аналізували стан сучасних стандартів у цій царині, тому в основному будемо аналізувати чинні документи та окремі проєкти.

Адаптована річна національна програма на 2024 рік, затверджена Протокольним рішенням Комісії з питань координації євроатлантичної інтеграції України від 11.01.2024, та Орієнтовний план заходів у рамках Комісії Україна – НАТО на кожний рік становлять стратегічний комплекс документів, які спрямовують державну політику у сфері євроатлантичної інтеграції та забезпечують переведення сектору безпеки та оборони на стандарти НАТО [1].

У [2] проведено порівняльний аналіз змісту вітчизняних і закордонних стандартів щодо систем розроблення та впровадження у виробництво ОВТ і підкреслено, що в Україні запроваджено такі нові стадії ЖЦ: задум, розроблення, виробництво, підтримка, – а також скорочено матеріальні витрати під час усього ЖЦ тощо. Крім того, запропоновано кількісний показник уніфікації та стандартизації виробів військового призначення.

Публікація [3] присвячена вивченню сучасних тенденцій у сфері управління повним ЖЦ складних систем озброєння. Зроблено висновок, що не лише спеціальні стандарти блоку НАТО в цій сфері визначають порядок розроблення, випробувань, постановки на озброєння, експлуатації та списання зразків ОВТ, а й цивільні міжнародні стандарти системної інженерії. Запропоновано концептуальні підходи до впровадження досвіду країн НАТО в Україні.

У [4] проаналізовано ефективність правового забезпечення гарантування якості продукції оборонного призначення у зв'язку із введенням у дію окремих стандартів НАТО щодо гарантування якості продукції оборонного призначення. Запропоновано використовувати ризик-орієнтований підхід разом із упровадженням стандарту STANAG 4107.

Формулювання завдання дослідження. Перехід на міжнародні стандарти з адаптацією їх положень до національних особливостей, ресурсних можливостей та стратегічних цілей є досить амбітною метою. Саме тому створення сучасної ефективної системи управління повним ЖЦ оборонної продукції з використанням сучасних світових практик та підходів країн – членів НАТО є актуальним науково-практичним завданням.

Нормативним базисом, що визначає політику та принципи УЖЦ озброєнь у Європейському Союзі (ЄС) та НАТО є міжнародні стандарти системної інженерії, а також стандарти з питань програмного й конфігураційного менеджменту, гарантування якості оборонної продукції, оцінювання вартості та ризиків ЖЦ, контракційного менеджменту, інтегрованої логістичної підтримки в експлуатації, управління технічною інформацією, єдиної ідентифікації предметів постачання, управління старінням, організації тестувань та випробувань, екологічного менеджменту й управління людськими ресурсами з використанням штучного інтелекту тощо. За розроблення цих стандартів і їх своєчасне впровадження відповідає група з питань УЖЦ озброєнь (Life Cycle Management Group LCMG) AC/327 Конференції національних директорів з озброєнь НАТО.

Виклад основного матеріалу

Терміни, визначення та скорочення. Законом України «Про оборонні закупівлі» від 17.07.2020 № 808 [5] та стандартами СУЖЦ ОВТ застосовані такі терміни з відповідними визначеннями:

життєвий цикл (ЖЦ) – сукупність взаємозв’язаних стадій товару, робіт і послуг оборонного призначення від задуму щодо їх створення до вилучення з обігу;

управління життєвим циклом (УЖЦ) продукції військового призначення – частина діяльності в галузі розроблення, виробництва, забезпечення експлуатації, ремонту та утилізації ОВТ, пов’язана із забезпеченням заданих вимог до них на основі поетапного планування та контролю відповідності ОВТ заданим вимогам на усіх стадіях, а також підтриманням у ході застосування шляхом керованого впливу на конструкцію зразків ОВТ, виробниче середовище та систему технічної експлуатації;

система УЖЦ (СУЖЦ) ОВТ – комплекс взаємопов’язаних національних стандартів, які встановлюють основні положення, правила та вимоги щодо виконання процесів, фаз, етапів і робіт протягом ЖЦ виробів ОВТ;

тактико-технічні (ТТХ) та експлуатаційно-технічні (ЕТХ) характеристики.

Система національної військової стандартизації. Національний орган стандартизації визначено постановою Кабінету Міністрів України від 21.08.2003 № 1337 «Про утворення Українського науково-дослідного і навчального центру проблем стандартизації, сертифікації та якості» [6]. Це державне підприємство не підлягає приватизації, реалізує державну політику у сфері стандартизації та не може мати на меті одержання прибутку від своєї діяльності.

Міністерство оборони України відповідає за діяльність 176 технічного комітету з питань військової стандартизації.

Наказом Міністерства оборони України від 24.02.2020 № 56 «Про питання військової стандартизації» одночасно затверджено «Положення про військову стандартизацію» та «Порядок розроблення, прийняття, внесення змін, скасування, відновлення дії, оприлюднення, запровадження та застосування військових стандартів» [7].

На сьогодні військові стандарти підрозділяються за змістом на:

оперативні, що встановлюють правила, процедури, функції, методи, вимоги до діяльності та її результатів у сферах планування, підготовки (за винятком питань, які охоплюють стандарти колективної та індивідуальної підготовки), повсякденної діяльності, застосування військ (сил), управління військами (силами), взаємосумісності підрозділів, безпеки і здоров’я цивільного населення, особового складу та довкілля;

адміністративні, які визначають терміни та тлумачення позначуваних ними понять, порядок управління документацією, фінансові, кадрові та інші питання, які не охоплено оперативними та матеріальними стандартами;

матеріальні, що розробляють на ОВТ та спеціальну техніку, інші предмети постачання, вимоги до яких встановлені стандартами НАТО та стандартами у сфері оборони держав – членів НАТО або які мають гриф обмеження доступу.

У 1976 році на базі Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД) та інших систем стандартизації документації: технологічної, програмної, виробничої, комплексної

системи загальних технічних вимог, а також комплексної системи контролю якості ОВТ та інших систем стандартизації – було створено Систему розробки й підготовки виробництва військової техніки (СРПВ ВТ). Система стандартів СРПВ ВТ колишнього СРСР включала всього 41 стандарт групи ГОСТ В 15.001-1978 [8].

Отже, сьогодні основою розроблення національної СУЖЦ ОВТ є:

міжнародні стандарти (ISO);

європейські (EN) й інші стандарти (IEC, IEEE, SAE, ASD);

стандарти НАТО щодо стандартизації та УЖЦ ОВТ;

оборонні стандарти держав – членів НАТО;

національні стандарти ДСТУ В 15.001:2023 [9], ДСТУ В1.0:2018 [10].

Цілі застосування СУЖЦ ОВТ:

упровадження портфельного, програмного та проектного менеджменту та процесного підходу до УЖЦ ОВТ;

спрощення підготовки та укладання договорів;

зниження ризиків (фінансових, корупційних, безпеки тощо) у програмах і проєктах;

постачання сучасних та якісних виробів ОВТ для Збройних Сил України, високий рівень їх готовності;

зниження вартості ЖЦ виробів ОВТ;

скорочення часу на розроблення, закупівлю, випробування, виробництво, постачання та підтримання виробів ОВТ;

ефективне використання всіх ресурсів.

СУЖЦ ОВТ. Загальні положення. Стандарти СУЖЦ ОВТ визначають загальні положення в галузі УЖЦ продукції військового призначення, включаючи основні положення, завдання, об'єкти та суб'єкти УЖЦ, а також функції основних організацій – учасників робіт на різних його стадіях.

Вимоги стандартів СУЖЦ ОВТ поширюються на такі види продукції військового призначення:

ОВТ; системи зв'язку й управління військами та ОВТ;

інженерно-технічні споруди, обладнання для бойового застосування ОВТ;

спеціальне обладнання для виробництва, ремонту, модернізації та (або) знищення (утилізації) ОВТ;

об'єкти для виробництва, експлуатації, ремонту, модернізації та (або) знищення (утилізації) ОВТ.

Застосування вимог стандартів СУЖЦ ОВТ до інших видів продукції або виробів та їх складових, які підпадають під дію стандартів, що встановлюють вимоги галузі УЖЦ конкретного виду техніки, визначається на розсуд постачальника та (або) замовника продукції.

У ході використання понять із цього стандарту визначення термінів можна змінювати, вводячи похідні ознаки, розкриваючи значення використовуваних термінів і вказуючи на об'єкти, що входять до поняття, яке тлумачиться.

Стандарти СУЖЦ ОВТ призначені для застосування на всіх стадіях ЖЦ продукції військового призначення.

Принципи УЖЦ, його суб'єкти та об'єкти. УЖЦ ОВТ здійснюють організаційно-розробницькі, організаційно-виробничі та ті, що експлуатують, а також інші учасники робіт у галузі планування розвитку ОВТ, їх розроблення, виробництва, забезпечення експлуатації та утилізації.

Зазначену діяльність здійснюють із використанням програмно-цільового підходу й комплексу технологій УЖЦ, зокрема в рамках контрактів ЖЦ щодо створення та забезпечення експлуатації ОВТ із заданим рівнем ефективності.

УЖЦ реалізують у рамках розроблених зацікавленими організаціями оборонно-промислового комплексу програм із конкретних зразків ОВТ. Для цього формують організаційно-технічну систему УЖЦ, що включає: суб'єкти та об'єкти управління; нормативно-правове та нормативно-технічне забезпечення діяльності; єдине інформаційне середовище підтримки процесу.

Суб'єктами УЖЦ у рамках програми робіт зі зразком ОВТ є:

уповноважені міністерства виконавчої влади;

органи управління програмою (дирекція програми на базі головного розробника / головного виробника зразка ОВТ);

головний виконавець (розробник) зразка ОВТ;

головний виробник (якщо він не входить до складу головного виконавця);

виконавці (субпідрядні організації);

науково-дослідні установи державних замовників та інші наукові організації.

Розподіл функцій УЖЦ між суб'єктами управління визначається програмою робіт зі зразком ОВТ та (або) змістом контракту і може змінюватися залежно від виду ОВТ.

Об'єктами УЖЦ є зразки ОВТ та їх складові в частині їх ТТХ (ЕТХ) та впливу цих характеристик на цільові критерії ефективності:

експлуатаційну готовність, автономність застосування тощо;

ціну ОВТ та вартість ЖЦ;

терміни створення та розгортання;

експлуатаційно-економічну ефективність ОВТ.

Нормативне забезпечення УЖЦ включає законодавство у сфері державного оборонного замовлення та військово-технічного співробітництва, міждержавні, національні та галузеві стандарти, а також спеціалізовану систему стандартів УЖЦ ОВТ.

Для інформаційної підтримки ЖЦ використовують сукупність методів та програмно-технічних засобів (інформаційних технологій), що забезпечують вирішення завдань УЖЦ у рамках програм робіт зі зразком ОВТ.

Основні завдання інформаційної підтримки ЖЦ включають:

створення та супровід інтегрованих інформаційних моделей виробів та системи їх технічної експлуатації в ході розроблення, підготовки виробництва, використання створених моделей на виробничих етапах та на стадії експлуатації (а за необхідності й на стадії утилізації) для забезпечення та постійного контролю характеристик (ТТХ / ЕТХ) ОВТ на усіх стадіях ЖЦ. Зазначені технології застосовують для інформаційної підтримки ЖЦ як типової конструкції зразка ОВТ, так і конкретного екземпляра ОВТ на всіх стадіях і етапах ЖЦ;

УЖЦ здійснюють щодо ОВТ, виробів (деталей, вузлів, агрегатів), які є складовими зразка ОВТ, та до засобів забезпечення ЖЦ ОВТ.

Під час УЖЦ ОВТ до засобів забезпечення його ЖЦ, які не є складовими самого комплексу (зразка), але використовуються в ході реалізації його ЖЦ, належать засоби забезпечення серійного виробництва та експлуатації, системи навчання, технічного обслуговування та ремонту, системи супроводу програмних засобів тощо. Кожен із них забезпечує частину (етап, стадію) ЖЦ ОВТ.



Рис. 1. Ієрархія нормативно-правових актів та нормативних документів СУЖЦ

Характеристики засобів забезпечення ЖЦ залежать від призначення та ТТХ / ЕТХ ОВТ. Частина з них, особливо засобів, розгорнутих ще до створення аналізованого ОВТ, самі можуть суттєво вплинути на прийняття рішень щодо ТТХ та ЕТХ новоствореного зразка ОВТ. Саме тому для УЖЦ зразок ОВТ та засоби забезпечення його ЖЦ розглядають як одну складну систему (рис. 1).

Відповідно до цієї ієрархічної структури розглянемо чинні національні стандарти у сфері УЖЦ ОВТ.

Модель ЖЦ. Для цілей УЖЦ використовують його загальну модель (із її різновидами за необхідності), формалізуючу послідовність і часові рамки процесів, потрібних для його реалізації, забезпечення та контролю заданих характеристик ОВТ, проєктованого, що виготовляється та експлуатується. Вказана модель розглядає ЖЦ ОВТ як цикл існування об'єкта від задуму до утилізації з можливістю відтворення його елементів.

Модель ЖЦ відображає два взаємопов'язані цикли:

цикл існування типової конструкції зразка подвійного та військового призначення, що включає: формування його типової конструкції, її використання (конструкторської документації (КД) та даних) для виробництва, супровід опису типової конструкції, у ході серійного виробництва, архівування (або знищення) КД та даних у разі припинення випуску;

цикл існування серійного екземпляра ОВТ, що включає: його виготовлення відповідно до стандарту типової конструкції, передачу зацікавленому користувачеві та

практичне застосування (включаючи його технічне обслуговування й ремонт), списання та утилізацію цього екземпляра ОВТ.

Для УЖЦ виділяють його характерні часові інтервали: стадії та етапи. Залежно від конкретного виду та складності ОВТ приймають базовий набір таких стадій та їх етапів. Кожна стадія (етап) має певну мету та результат, спрямовані на досягнення кінцевих цілей і результатів ЖЦ конкретного виду (зразка) ОВТ.

Стадії ЖЦ – основні його частини (часові відрізки), що є значущими періодами зміни стану зразка ОВТ від появи в ньому потреби до експлуатації та подальшої утилізації. Вони характеризуються завданнями, сукупністю виконуваних робіт та кінцевими результатами.

Стадії ЖЦ для складних видів ОВТ розбивають на частини, що відповідають контрольним етапам і термінам, у разі досягнення яких передбачають перевірку результатів робіт, включаючи контроль характеристик ОВТ: типової конструкції та (або) конкретних екземплярів зразка.

Під час переходу між стадіями (етапами) ЖЦ суб'єкти його управління приймають це рішення. Типовий склад, призначення стадій ЖЦ та критерії прийняття рішень про перехід до наступної стадії ЖЦ зразка ОВТ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Типові стадії ЖЦ

Стадія ЖЦ	Призначення	Критерії прийняття рішень про перехід до наступної стадії
Створення науково-технічного завдання (НТЗ)	Визначення вимог до перспективного зразка ОВТ та шляхів виконання цих вимог (нових схем, технологій, матеріалів тощо), ідентифікація основних ризиків, оцінка реалізованості задуму в розумні терміни з прийнятними витратами	Готовність до закінчення стадії та початку розроблення визначається відповідністю сформованих вимог до ОВТ та НТЗ поставленим цілям з урахуванням найбільш перспективних напрямків створення ОВТ
Формування концепції зразка ОВТ (аванпроект)	Розробка аванпроекту шляхом поглиблених досліджень, експериментів та інженерних напрацювань на основі раніше створеного НТЗ для обґрунтування технічних рішень та підготовки проекту тактико-технічного завдання на зразок ОВТ, демонстрація принципової реалізованості, економічної доцільності пропонувананих науково-технічних рішень для досягнення поставлених цілей	Готовність до закінчення стадії та початку повномасштабного проектування визначається наявністю узгодженої позиції зацікавлених сторін щодо практичної можливості й економічної доцільності реалізації запропонованих науково-технічних рішень або щодо недоцільності створення цього зразка ОВТ через високі ризики
Розробка	Конструювання, моделювання та технологічне відпрацювання виробу (ескізне, технічне, робоче проєктування), будівництво та випробування дослідних зразків	Готовність до закінчення стадії та початку виробництва визначається наявністю узгодженої позиції зацікавлених сторін щодо бойової та техніко-економічної ефективності розроблених зразків ОВТ, прийнятності для практичного використання в заданих цілях або щодо недоцільності запуску в серійне виробництво через високі ризики для успішної реалізації ЖЦ

Стадія ЖЦ	Призначення	Критерії прийняття рішень про перехід до наступної стадії
Виробництво	Виготовлення потрібної кількості серійних екземплярів ОВТ прийнятої конструкції, а також необхідні для виробництва й експлуатації ОВТ оснастки та засоби забезпечення експлуатації	Готовність до початку виробництва визначається наявністю затвердженої робочої КД та необхідних даних, які утворюють електронний та (або) інший опис затвердженої типової конструкції ОВТ, а також завершенням підготовки виробництва, відповідністю наявних кадрових, фінансових та інших ресурсів необхідним для серійного виробництва ОВТ
Експлуатація	Використання ОВТ за призначенням, зокрема введення в експлуатацію та цільове застосування. Крім того, на стадії експлуатації здійснюють технічне обслуговування та ремонт, а за необхідності виконують модифікацію (модернізацію) ОВТ	Готовність початку експлуатації визначається наявністю необхідної кількості зразків ОВТ, що задовольняють узгоджені вимоги, завершенням підготовки до експлуатації, а також відповідністю наявних кадрових, фінансових та інших ресурсів потрібним для початку експлуатації
Капітальний ремонт (за необхідності)	Для окремих видів складної техніки може бути передбачений капітальний ремонт як особливий етап експлуатації або навіть окрема стадія ЖЦ, коли використання такого виду ОВТ за призначенням припиняється	Готовність початку капітального ремонту визначається наявністю затверджених ремонтних документів та даних, завершенням підготовки ремонтного виробництва, а також відповідністю наявних кадрових, фінансових та інших ресурсів необхідним для капітального ремонту ОВТ
Утилізація	Виведення з експлуатації, демілітаризація та застосування за іншим призначенням або знищення для вторинного використання наявних у складі ОВТ виробів та матеріалів, завершення надання послуг із забезпечення експлуатації з боку постачальника, за потреби можуть виконуватися роботи з диверсифікації або утилізації засобів забезпечення експлуатації цього виду ОВТ	Готовність до початку утилізації визначається наявністю необхідної кількості зразків ОВТ згідно з погодженими умовами для виведення з експлуатації та утилізації, завершенням підготовки утилізації, а також відповідністю наявних кадрових, фінансових та інших ресурсів потрібним для початку утилізації цього виду ОВТ. Готовність до закінчення утилізації визначається наявністю узгодженої позиції зацікавлених сторін

Основні документи ЄС та НАТО з питань СУЖЦ ОВТ. Під СУЖЦ ОВТ розуміємо складну організаційну систему, що об'єднує усіх суб'єктів управління взаємосумісною інформаційною системою обміну технічними даними про оборонну продукцію, товари, роботи та послуги оборонного призначення, а також забезпечує їх скоординовану діяльність і взаємодію між собою та навколишнім середовищем на основі нормативно-правового базису й системи національних і військових стандартів із питань УЖЦ ОВТ.

Метою СУЖЦ ОВТ є задоволення потреб складових сектору безпеки та оборони держави в ОВТ, забезпечення сталого зростання частки нових високоякісних та взаємосумісних із НАТО зразків ОВТ і частки впроваджених інноваційних і проривних технологій, збільшення термінів надійної та безпечної експлуатації ОВТ, оптимізації усіх

видів ресурсів, ідентифікації та зниження можливих ризиків відповідно до встановлених законодавством правових норм щодо закупівлі, розроблення, виробництва, експлуатації, модернізації, обслуговування, ремонту (відновлення), підтримки в експлуатації та утилізації ОВТ, а також здійснення взаємовигідного міжнародного військово-технічного співробітництва.

НАТО використовує стандарти ЄС ISO/IEC/IEEE 15288 [11] та ISO/IEC TS 24748-1 [12] як основу для реалізації СУЖЦ (адаптуючи її для своїх цілей) та політики НАТО з УЖЦ.

Основними документами НАТО з питань УЖЦ ОВТ є [13–22].

Система національних стандартів СУЖЦ ОВТ. Структура СУЖЦ ОВТ передбачає 10 класифікаційних груп стандартів, зокрема такі:

нульова група – стандарти основних положень, вимоги яких розповсюджуються на всі стадії ЖЦ;

класифікаційні групи № 1–8 прив’язані до ДСТУ В 15.004-2022. Стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки: задум, розроблення, виробництво, використання, вилучення. Вони узгоджуються з міжнародними стандартами ISO і доповнені вимогами НАТО [6];

класифікаційна група № 9 – інші стандарти, які не належать до попередніх класифікаційних груп.

Термінологія в системі використовується згідно з ДСТУ В 8821-1:2018. Стандартизація у сфері озброєння та військової техніки. Частина 1. Основні терміни та визначення понять [23].

Розглянемо склад стандартів СУЖЦ ОВТ за класифікаційними групами.

Класифікаційна група «0» вміщує 13 стандартів, зокрема:

стандарт ДСТУ В 15.001:2023. Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Основні положення, що визначає цілі, завдання і структуру системи стандартів УЖЦ ОВТ;

інші стандарти групи регламентують вимоги до плану управління програмою (проектом), основні положення щодо стадій і процесів ЖЦ, інтегрованої логістичної підтримки, управління конфігурацією, ризиками, якістю, надійністю, оцінювання вартості ЖЦ, експертиз і аудитів.

Класифікаційна група «1» вміщує 8 стандартів, зокрема:

стандарти вимог до технічних завдань на проведення науково-дослідних робіт і аванпроектів;

стандарти щодо проведення науково-дослідних робіт і аванпроектів;

стандарт щодо розроблення й організації виробництва матеріалів для виробів ОВТ;

стандарт, який регламентує роботи зі стандартизації та уніфікації;

на етапі розроблення стандарт основних положень щодо уніфікації.

Класифікаційна група «2» вміщує 7 стандартів, зокрема:

стандарт вимог до технічного завдання на проведення дослідно-конструкторських робіт;

стандарт щодо проведення дослідно-конструкторських робіт;

стандарт щодо програм забезпечення надійності для виробів ОВТ;

стандарт щодо обмежувальних переліків;

стандарти щодо випробувань дослідних зразків ОВТ та програм і методів цих випробувань;

стандарт щодо розроблення керівних вказівок із конструювання.

Класифікаційна група «3» вміщує такі три стандарти:

стандарт щодо постановки на виробництво ОВТ;

стандарт щодо встановлення гарантійних зобов'язань;

стандарт щодо приймання і випробувань серійних виробів після їх виготовлення.

Класифікаційна група «4» складається з одного стандарту щодо постачання ОВТ замовнику або споживачу.

Класифікаційна група «5» вміщує два стандарти:

стандарт щодо вимог до експлуатаційної та ремонтної документації;

стандарт щодо загальних правил експлуатації ОВТ.

Класифікаційна група «6» також вміщує два стандарти:

стандарт щодо розроблення ремонтної документації;

стандарт щодо ремонту ОВТ.

Класифікаційна група «7» вміщує шість стандартів:

стандарт щодо бюлетенів змін до ОВТ і документації на них;

стандарт щодо встановлення та продовження призначених показників;

стандарт щодо реклаमाційної роботи;

стандарт щодо логістичної підтримки під час експлуатації;

стандарт щодо запасних частин, інструментів, приладдя і матеріалів;

стандарт щодо аналізу логістичної підтримки.

Класифікаційна група «8» вміщує три стандарти:

стандарт щодо зняття з виробництва ОВТ;

стандарт щодо зняття з виробництва матеріалів;

стандарт щодо управління старінням та вилучення.

Класифікаційна група «9» також вміщує три стандарти:

стандарт щодо метрологічного забезпечення ОВТ;

стандарт щодо управління документами в рамках програми;

стандарт щодо авторського і технічного нагляду на певних стадіях ЖЦ ОВТ.

Проблеми та недоліки. Аналіз поточної ситуації нормативно-правового забезпечення щодо УЖЦ ОВТ дозволяє сформулювати такі основні проблеми запровадження стандартів СУЖЦ ОВТ, а саме:

недостатня кількість навчених менеджерів для проєктів, управління надійністю, ризиками, якістю, кодифікацією тощо;

недосконалість законодавства у сфері ОВТ (відсутність законодавчої основи СУЖЦ);

невідповідність організаційних структур силових відомств вимогам портфельного, програмного (проєктного) менеджменту, часткове запровадження практики політик щодо використання процесів СУЖЦ ОВТ;

потребує вдосконалення нормативна база, що визначає порядок використання технологій на етапах ЖЦ;

не використовується в повній мірі база даних реєстру КД ОВТ у разі проєктування, кодифікації, формування державного оборонного замовлення та матеріально-технічного забезпечення ОВТ з урахуванням вимог СУЖЦ;

концепція CALS і стандарти щодо CALS-технологій поки що не знайшли широкого застосування;

неефективність системи збирання інформації про реальні показники витрати ресурсів, надійності, готовності, витрат на кожному етапі ЖЦ виробу;

недоліки механізмів об'єктивного розрахунку вартості кожного етапу ЖЦ виробу;

недостатньо розвинені засоби моделювання ЖЦ виробів, що не дозволяють на стадії розроблення прогнозувати його вартісні й ТТХ;

незавершеність робіт із переведення в цифровий вигляд проєктної, наукової, інтерактивної експлуатаційної документації щодо наявних та розроблюваних зразків ОВТ.

При цьому недостатню увагу приділено питанням управління повним ЖЦ ОВТ, пов'язаним із широкомасштабним використанням у зразках перспективних цифрових технологій, зокрема технологій штучного інтелекту (ШІ).

Реформування комплексу стандартів системи розробки та постановки на виробництво ОВТ у СУЖЦ ОВТ з урахуванням вимог стандартів країн ЄС та НАТО успішно проводиться ТК 176 Міністерства оборони України [3, 24].

Висновки. Адаптація українського законодавства до вимог НАТО в галузі УЖЦ ОВТ потребує суттєвого перегляду національної нормативно-правової бази, що передбачає перероблення старих та розроблення нових стандартів і нормативно-правових документів.

У статті проаналізовано сучасні тенденції у сфері стандартизації процесів управління повним ЖЦ складних зразків ОВТ в Україні та країнах ЄС.

Надано історичну довідку щодо етапів реформування системи стандартів із розроблення та впровадження у виробництво системи УЖЦ ОВТ.

Наведено типовий склад, призначення стадій ЖЦ ОВТ та критерії прийняття рішень про перехід між ними.

Зазначено основні документи ЄС, НАТО та національні стандарти з питань СУЖЦ ОВТ. Розкрито сутність поняття управління (менеджмент) повним ЖЦ ОВТ та основні види діяльності з його реалізації. Проаналізовано наявність і достатність необхідних передумов для реформування чинної та створення на її базі нової СУЖЦ оборонної продукції за стандартами ЄС. Показано, що нормативним базисом, який визначає політику та принципи УЖЦ складних виробів і систем, є вітчизняні та міжнародні стандарти системної інженерії.

Вказано на проблеми й недоліки, надано пропозиції щодо подальших досліджень. Зокрема, перспективним напрямком в удосконаленні СУЖЦ вважається розроблення стандартів, які описують процеси ЖЦ ОВТ із застосуванням таких технологій:

інтегрована логістична підтримка продукції військового призначення, що поставляється на експорт, на всіх стадіях ЖЦ;

інтегрована логістична підтримка продукції військового призначення, що отримується за імпортом;

особливості процесів ЖЦ ОВТ із ШІ;

серійні стаціонарні комплекси озброєння та інші серійні стаціонарні об'єкти військової техніки.

Провідні держави світу вживають заходи щодо переозброєння своїх військ. Зміни способів ведення збройної боротьби формують нові потреби в розробленні озброєння на

основі нових фізичних принципів із використанням квантових, інформаційних, космічних, гіперзвукових, біотехнологій, а також ШІ, вони створюють нові матеріали, робототехніку та автономні безпілотні апарати, удосконалюють неядерне високоточне озброєння тощо.

На сучасному етапі одним із найбільш перспективних напрямів удосконалення ОВТ є застосування технологій ШІ, що дозволяють різко підвищити ефективність виконання завдань збору та оброблення інформації щодо різних зразків ОВТ. При цьому стримуючим фактором повномасштабного впровадження ШІ в ОВТ є недостатня опрацьованість принципів УЖЦ складних технічних систем, розроблених із використанням цих технологій.

Динамічний розвиток сучасних вітчизняних ОВТ багато в чому ґрунтується на принципах управління повним ЖЦ: від моделювання та проектування до серійного випуску виробів, забезпечення їх експлуатації та подальшої утилізації.

Для розвитку системи СУЖЦ ОВТ, удосконалення системи стандартизації, уніфікації та управління якістю продукції планується зосередити зусилля на:

здійсненні заходів щодо впровадження стандартів НАТО, міжнародних (регіональних) стандартів в оборонно-промисловому комплексі;

удосконаленні державної системи стандартизації продукції військового і цивільного призначення, створенні та впровадженні системи забезпечення національними й галузевими стандартами, які адаптовані до стандартів НАТО та ЄС, здійсненні правової та державної підтримки підприємств оборонно-промислового комплексу під час упровадження міжнародних стандартів;

створенні електронної бази нормативних документів зі стандартизації, що діють в Україні (ДСТУ, ОСТ та інших на безоплатній основі для державних замовників та виконавців науково-технічної продукції військового призначення);

забезпеченні перегляду (продовження дії) необхідних міждержавних стандартів ДСТУ, ДСТУ В та галузевих стандартів (ОСТ, ОСТ В), а за необхідності на розробленні на їх основі національних стандартів;

впровадженні заходів щодо гармонізації систем стандартизації, контролю якості та сертифікації продукції з аналогічними системами закордонних споживачів і виробників продукції оборонно-промислового комплексу;

впровадженні механізмів управління якістю продукції відповідно до міжнародних стандартів ISO та інших міжнародних і європейських документів з управління якістю;

удосконаленні системи і механізмів уніфікації продукції військового призначення та подвійного використання, зокрема шляхом впровадження кодексів усталеної практики (методик) щодо проведення підприємствами оборонно-промислового комплексу міжгалузевої, галузевої і заводської уніфікації.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Адаптована річна національна програма на 2024 рік, затверджена Протокольним рішенням Комісії з питань координації євроатлантичної інтеграції України від 11.01.2024. URL: https://dsa.court.gov.ua/dsa/pokazniki-diyalnosti/234/adaptovana_richna_2024 (дата звернення: 01.06.2025).

2. Аналіз нового національного стандарту щодо стандартизації та уніфікації спеціальної техніки / В. Г. Шапоренко, А. Г. Козир, Д. В. Зройчиков та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. Ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. № 8 (2). С. 140–146. <https://doi.org/10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.15>
3. Реформування національної системи управління життєвим циклом озброєння та військової техніки за стандартами НАТО / К. К. Кулагін, О. І. Солонець, О. І. Ведмідь та ін. // Системи озброєння і військова техніка. 2022. № 3 (71). С. 24–34. <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.71.04>
4. Повидиш В. В. Адміністративно-правове забезпечення державного гарантування якості товарів, робіт і послуг оборонного призначення в Україні // Право та державне управління. 2023. № 3. С. 122–126. <https://doi.org/10.32782/pdu.2023.3.18>
5. Про оборонні закупівлі : Закон України від 17.07.2020 № 808. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/808-20#Text> (дата звернення: 01.06.2025).
6. Про утворення Українського науково-дослідного і навчального центру проблем стандартизації, сертифікації та якості : постанова Кабінету Міністрів України від 21.08.2003 № 1337. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1337-2003-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.06.2025).
7. Про питання військової стандартизації : наказ Міністерства оборони України від 24.02.2020 № 56 зі змінами згідно з наказом Міністерства оборони України від 16.07.2024 № 482. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0240-20#n8> (дата звернення: 01.06.2025).
8. ГОСТ В 15.001-1978. Система розробки и подготовки производства ВТ. Основные положения : комплекс стандартів. Москва, 1978. 28 с.
9. ДСТУ В 15.001:2023. Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Основні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 22 с.
10. ДСТУ В1.0:2018. Стандартизація у сфері озброєння та військової техніки. Основні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 44 с.
11. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016. Інженерія систем і програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 80 с.
12. ДСТУ ISO/IEC TS 24748-1:2018. Інженерія систем і програмних засобів. Керування життєвим циклом. Ч. 1. Настанови щодо керування життєвим циклом (ISO/IEC TS 24748-1:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 83 с.
13. AAP-20 NATO Programme Management Framework (NATO Life Cycle Model). URL: <https://tssodyp.ssb.gov.tr/genel/ReferansDokumanlar/AAP-20-2015.pdf> (last accessed: 01.06.2025).
14. AAP-48 NATO System Life Cycle Processes. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14514800/aap-48> (last accessed: 01.06.2025).
15. Настанова до зводу знань з управління проектами (настанова PMBOK). URL: <https://pmiukraine.org/pmbok7> (дата звернення 01.06.2025).
16. Конфігураційний менеджмент: STANAG 4427. URL: https://store accuristech.com/standards/stanag-4427?product_id=1982700&srsltid=AfmBOoqE8TX8q3RyIB2A3YoYRkbN8-mi6oH2rZZ6Mnqh8YwutLvPsWNF (дата звернення 01.06.2025).

17. ДСТУ STANAG 4107:2018. Вимоги НАТО щодо забезпечення якості за остаточного контролю (STANAG 4107 Ed:10/AQAP-2131 Ed. C Ver. 1, IDT). Київ : ДП УкрНДНЦ, 2018. 20 с.
18. STANREC 4755, ALCCP-1. Управління вартістю: URL: <https://standards.globalspec.com/std/14246882/stanrec-4755> (дата звернення: 01.06.2025).
19. ДСТУ STANREC 4174:2021. Наставови щодо оцінювання надійності озброєння та військової техніки в процесі експлуатації (STANREC 4174 Ed:4/ADMP-02, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92340 (дата звернення: 01.06.2025).
20. ВСТ 01.054.001-2021 (01). Управління ризиками. Керівництво з управління ризиками в програмах закупівель (STANREC 4739 Ed:1 / ARAMP-1 Ed:1, NATO Risk Management Guide for Acquisition Programmes, IDT). URL: <https://mod.gov.ua/diyalnist/normativno-pravova-baza/aramp-1-edition-1-nato-risk-management-guide-for-acquisition-programmes-idt> (дата звернення: 01.06.2025).
21. ДСТУ STANAG 4370:2021. Озброєння та військова техніка. Вимоги та методи механічних випробувань (STANAG 4370 Ed:6/AECTP-400 Ed. 3, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92303 (дата звернення: 01.06.2025).
22. STANAG 4597. Управління виведенням з експлуатації та утилізацією. URL: <https://ru.scribd.com/document/407127268/NATO-obsolescence-management-pdf> (дата звернення: 01.06.2025).
23. ДСТУ В 8821-1:2018. Стандартизація у сфері ОБТ. Ч. 1. Основні терміни та визначення понять. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 44 с.
24. Проблеми оборонного менеджменту : теорія і практика : матеріали наук.-практ. конф. (Київ, 26 жовтня 2023 р.) / Ред. М. Я. Ткач. Київ : Нац. ун-т оборони України, 2023. 213 с.

Стаття надійшла до редакції 23.07.2025.

REFERENCES

- Adaptovana richna natsionalna prohrama na 2024 rik, zatverdzhena Protokolnym rishenniam Komisii z pytan koordynatsii yevroatlantychnoi intehratsii Ukrainy vid 11.01.2024 [Adapted Annual National Program for 2024, approved by the Protocol Decision of the Commission on Euro-Atlantic Integration Coordination of Ukraine, January 11, 2024].* Retrived from https://dsa.court.gov.ua/dsa/pokazniki-diyalnosti/234/adaptovana_richna_2024 [in Ukrainian].
- Shaporenko, V. H., Kozyr, A. H., & Zroichykov, D. V. et al. (2021). Analiz novoho natsionalnoho standartu shchodo standartyzatsii ta unifikatsii spetsialnoi tekhniky [Analysis of the New National Standard for the Standardization and Unification of Special Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. In-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Journal of the State Research Institute for Testing and Certification of Arms and Military Equipment]*, 8 (2), 140–146. <https://doi.org/10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.15> [in Ukrainian].

3. Kulahin, K. K., Solonets, O. I., & Vedmid, O. I. et al. (2022). Reformuvannya natsionalnoi systemy upravlinnia zhyttievym tsyklom ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki za standartamy NATO [Reforming the National System of Life Cycle Management of Weapons and Military Equipment According to NATO Standards]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Weapons Systems and Military Equipment]*, 3 (71), 24–34. <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.71.04> [in Ukrainian].
4. Povydysh, V. V. (2023). Administratyvno-pravove zabezpechennia derzhavnogo harantuvannia yakosti tovariv, robot i posluh oboronnoho pryznachennia v Ukraini [Administrative and Legal Support for State Quality Assurance of Defense-Related Goods, Works, and Services in Ukraine]. *Pravo ta derzhavne upravlinnia [Law and Public Administration]*, 3, 122–126. <https://doi.org/10.32782/pdu.2023.3.18> [in Ukrainian].
5. *Pro oboronni zakupivli: Zakon Ukrainy vid 17.07.2020 № 808 [On Defense Procurement: Law of Ukraine from 17.07.2020 № 808]*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/808-20#Text> [in Ukrainian].
6. *Pro utvorennia Ukrainskoho naukovo-doslidnogo i navchalnogo tsentru problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti: postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21.08.2003 № 1337 [On the Establishment of the Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 21.08.2003 № 1337]*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1337-2003-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
7. *Pro pytannia viiskovoi standartyzatsii: nakaz Ministerstva oborony Ukrainy vid 24.02.2020 № 56 zi zminamy zghidno z nakazom Ministerstva oborony Ukrainy vid 16.07.2024 № 482 [On Military Standardization Issues: Order of the Ministry of Defense of Ukraine from 24.02.2020 № 56 as amended by Order of the Ministry of Defense of Ukraine from 16.07.2024 № 482]*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0240-20#n8> [in Ukrainian].
8. *GOST V 15.001-1978. Sistema rozrobotky i podhotovki proizvodstva VT. Osnovnye polozhenia: kompleks standartov [System for the Development and Preparation of Military Production. Basic Provisions]*. (1978). Moscow [in Russian].
9. *DSTU V 15.001:2023. Systema keruvannia zhyttievym tsyklom ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki. Osnovni polozhennia [Life Cycle Management System for Armament and Military Equipment. Basic Provisions]*. Kyiv [in Ukrainian].
10. *DSTU VI.0:2018. Standartyzatsiia u sferi ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki. Osnovni polozhennia [National Standardization. Standardization in the Field of Armament and Military Equipment. Basic Provisions]*. Kyiv [in Ukrainian].
11. *DSTU ISO/IEC/IEEE 15288:2016. Inzheneriia system i prohramnoho zabezpechennia. Protsesy zhyttievoho tsyклу system [Systems and Software Engineering. System Life Cycle Processes] (ISO/IEC/IEEE 15288:2015)*. Kyiv [in Ukrainian].
12. *DSTU ISO/IEC TS 24748-1:2018. Inzheneriia system i prohramnykh zasobiv. Keruvannia zhyttievym tsyklom. Ch. 1. Nastanovy shchodo keruvannia zhyttievym tsyklom [Systems and Software Engineering. Life Cycle Management. Part 1. Guide for Life Cycle Management] (ISO/IEC TS 24748-1:2016, IDT)*. Kyiv [in Ukrainian].

13. AAR-20 NATO Programme Management Framework (NATO Life Cycle Model). (n.d.). Retrieved from <https://tssodyp.ssb.gov.tr/genel/ReferansDokumanlar/AAP-20-2015.pdf>
14. AAR-48 NATO System Life Cycle Processes. (n.d.). Retrieved from <https://standards.globalspec.com/std/14514800/aap-48>
15. *Nastanova do zvodu znan z upravlinnia proiektamy (nastanova PMBOK) [A Guide to the Project Management Body of Knowledge (A Guide PMBOK)]*. (n.d.). Retrieved from <https://pmiukraine.org/pmbok7> [in Ukrainian].
16. NATO, STANAG 4427. *Configuration Management*. (n.d.). Retrieved from https://store accuristech.com/standards/stanag-4427?product_id=1982700&srsltid=AfmBOoqE8TX8q3RyIB2A3YoYRkbN8-mi6oH2rZZ6Mnqh8YwutLvPsWNF
17. NATO, STANAG 4107 / AQ AP publications. *Quality Management*. (n.d.). Retrieved from <https://standards.globalspec.com/>
18. NATO, STANAG 4755 / ALCCP-1 *Cost Management*. (n.d.). Retrieved from <https://standards.globalspec.com/std/14246882/stanrec-4755>
19. NATO, STANAG 4174 / ADMP-01 *Reliability Management*. (n.d.). Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92340
20. NATO, STANAG 4739 / ARAMP-1 *Risk Management*. (n.d.). Retrieved from <https://mod.gov.ua/diyalnist/normativno-pravova-baza/aramp-1-edition-1-nato-risk-management-guide-for-acquisition-programmes-idt>
21. NATO, STANAG 4370 *Environmental Conditions and Testing*. (n.d.). Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92303
22. NATO, STANAG 4597 *Disposal and Decommissioning Management*. (n.d.). Retrieved from <https://ru.scribd.com/document/407127268/NATO-obsolescence-management-pdf>
23. DSTU V 8821-1:2018. *Standartyzatsiia u sferi OVT. Ch. 1. Osnovni terminy ta vyznachennia poniat [Standardization in the Field of Armament and Military Equipment. Part 1. Basic Terms and Definitions]*. Kyiv [in Ukrainian].
24. *Problemy oboronnoho menedzhmentu: teoriia i praktyka: materialy nauk.-prakt. konf. [Problems of Defense Management: Theory and Practice: Proceedings of the Scientific-Practical Conference]*. Kyiv, October 26, 2023 [in Ukrainian].

O. Ye. Sokulskiy, V. O. Chumakevych, Ye. O. Topolskov

STATUS OF DEVELOPMENT AND REVIEW OF STANDARDS FOR THE LIFECYCLE MANAGEMENT SYSTEM OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

The article analyzes current trends in the standardization of processes for managing the full life cycle of complex weapons and military equipment in Ukraine and the European Union. As methods and approaches to the use of such systems are being re-evaluated, the strategies for planning and managing life cycle stages are evolving, making this topic insufficiently explored. The paper presents the terms, definitions, and abbreviations related to the life cycle management system; its objectives, basic provisions, and guiding principles; its objects and subjects; as well as the hierarchy of regulatory acts and documents governing the life cycle management of weapons and military equipment.

A historical overview is provided of the stages in reforming the system of standards for development and production within the life cycle management system for weapons and military equipment. The typical composition and purpose of each stage in the life cycle, along with the criteria for decision-making on transitions between stages, are examined.

The main EU and NATO documents are outlined, along with national standards developed in the field of life cycle management for weapons and military equipment. The essence of the concept of full life cycle management of weapons and military equipment, as well as the main types of activities for its implementation, are described. The availability and adequacy of the prerequisites for reforming the current system and creating, on its basis, a new life cycle management system for defense products in line with EU standards are analyzed.

It is demonstrated that the regulatory framework defining the policy and principles of life cycle management for complex products and systems consists of domestic and international systems engineering standards. Conclusions are drawn, and proposals are provided regarding the prospects for further research.

Keywords: *life cycle of weapons and military equipment; life cycle management system; objects and subjects of life cycle management; integrated logistical support; management; artificial intelligence.*

Д. А. Іщенко, В. В. Стрінада

ФОРМУВАННЯ ЗАДУМУ УДАРНОГО БЕЗПЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ З УРАХУВАННЯМ ПРОГНОЗОВАНОГО РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИКРИТТЯ ОБ'ЄКТА ВІД УДАРІВ ІЗ ПОВІТРЯ

За результатами аналізу тенденцій розвитку збройної боротьби щодо застосування ударних (розвідувально-ударних) безпілотних авіаційних комплексів та їх ефективності в умовах радіоелектронної боротьби показано необхідність удосконалення науково обґрунтованого порядку формування задуму таких виробів (комплексів) озброєння та військової техніки з урахуванням прогнозованого радіоелектронного прикриття об'єкта від ударів із повітря.

Встановлено безпосередню залежність ефективності ударних (розвідувально-ударних) безпілотних авіаційних комплексів від спроможностей противника з радіоелектронного прикриття необхідних об'єктів від повітряної розвідки і прицільних ударів із повітря, що визначаються характеристиками засобів радіоелектронної боротьби. Запропоновано показник – зона радіоелектронного прикриття наземного об'єкта, – який дозволяє прогнозовано опосередковано оцінювати просторові можливості безпілотного авіаційного комплексу із завдання прицільних ударів із повітря по цілі. На прикладі наведено порядок визначення такої зони графоаналітичним методом за прогнозованими просторовими показниками (дальність, висота), залежними від енергетичних характеристик, відповідно, радіоелектронних засобів безпілотного авіаційного комплексу і зразка техніки радіоелектронної боротьби.

Запропоновано використання показника можливостей противника з радіоелектронного прикриття від ударів із повітря в ході підготовки даних для формування задуму розвідувально-ударного комплексу як сукупності безпілотних перешкодостійких засобів з урахуванням результатів аналізу досвіду збройної боротьби.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; зона радіоелектронного прикриття об'єкта; радіоелектронна боротьба; розвідувально-ударний комплекс; спроможність; задум як стадія життєвого циклу виробу озброєння та військової техніки.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Досвід широкомасштабної агресії рф проти України показує, що:

по-перше, певним чином заміщенням (доповненням) традиційних засобів вогневого ураження в тактичній ланці бойових дій стали безпілотні літальні апарати (БпЛА) (мікро, міні), зокрема керовані за методом FPV та такі, що діють зі скиданням боєприпасів ударних (розвідувально-ударних (РУ)) безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) тактичного класу;

по-друге, залежність ефективності таких БпАК від спроможностей противника з радіоелектронного прикриття (РЕПр) власних об'єктів від повітряної розвідки та

прицільних ударів із повітря, що визначаються характеристиками засобів РЕПр – зразків техніки радіоелектронної боротьби (РЕБ) (ближньої дії) з БпЛА;

по-третє, управління життєвим циклом (ЖЦ) таких виробів (зразків, комплексів, систем) озброєння та військової техніки (ОВТ) має певні особливості, а саме потребує врахування, що згідно з [1] для новостворюваного або модернізованого виробу ОВТ – ударного (РУ) БпЛАК – стадії задум та розроблення повинні бути застосовані обов'язково.

На теперішній час необхідно дотримуватися порядку формування вимог до ОВТ [2], що відображає особливості воєнного стану, з урахуванням нормативних положень [1] щодо ЖЦ виробів військового призначення (ВВП). Стадія задум є визначальною для всього ЖЦ, зокрема і для стадії використання. Досягнення правильності задуму ВВП потребує результатів об'єктивного всебічного аналізу наявних подібних зразків прототипів комплексів, систем щодо їх місця й ролі у збройній боротьбі та прогнозування ефективності якісно нового (модернізованого) виробу, відповідно до тенденцій її розвитку. Формування задуму ВВП потребує врахування виникнення ризиків, які можуть мати негативний вплив на досягнення мети – набуття необхідних спроможностей [3] та отримання бажаного результату.

Але практика показує, що частина розробників не завжди мають можливість оцінювати відповідність задуму певного зразка його потрібним бойовим можливостям. За відсутності необхідних показників виникає проблема своєчасного коригування задуму та застосування рекурсивної моделі процесу їх ЖЦ. Потреба розроблення ефективних зразків, за відсутності науково-методичного забезпечення оцінювання їх бойових можливостей, переростає в проблему прийняття обґрунтованих рішень, що повинні бути основою задуму.

Оскільки встановлено безпосередню залежність ефективності ударних (РУ) БпЛАК від спроможностей противника з РЕПр визначених об'єктів від повітряної розвідки і прицільних ударів із повітря, що оцінюються за характеристиками засобів РЕБ, необхідно сформувати показник можливостей вказаних ВВП, які застосовуються на стадії задум, це є складовою розв'язання такої проблеми та актуальним науково-практичним завданням дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що в більшості робіт, присвячених проблемам формування задуму ударного БпЛАК з урахуванням прогнозованого РЕПр об'єкта удару, процес прийняття ґрунтовних ефективних рішень на встановлення потрібних характеристик комплексів розглянуто лише частково [4–6].

У [4] розглянуто окремі питання, пов'язані зі справжнім революційним проривом у виробництві в Україні безпілотних систем (БпС) різного призначення, надано результати системного аналізу їх впливу на архітектуру військової справи.

Аналіз концептуальних поглядів на розвиток та застосування БпС у Збройних Силах України з визначенням їх завдань за різних підходів до їх формування, викликів та застережень щодо застосування роботизованих систем та перспектив їх розвитку в сучасних умовах проведено в [5].

Результати дослідження загальних підходів до формалізації та моделювання процесів застосування сил і засобів збройної боротьби, наведені в [6], показали можливість використання математичних методів для опису й моделювання дій за призначенням БпС і РЕБ.

Нормативною базою, яка встановлює типові стадії ЖЦ ОВТ, фази (етапи) робіт та їхній зміст на кожній із них, а також визначає підхід для реалізації оптимальних методів керування ЖЦ ОВТ і дозволяє розробникам обрати оптимальний набір цих стадій, їхніх фаз та етапів залежно від мети, економічних чинників та наявних ризиків, є [2].

Досить повно й усебічно висвітлюють результати теоретичних і практичних досліджень питань РЕБ, пов'язаних зі створенням, впровадженням та застосуванням зразків ОВТ, нормативні документи й публікації [7, 8].

Для дослідження просторово-часових можливостей підрозділів РЕБ та БпС, які в їх протиборстві потрібно розглядати як протиставні, може бути використана інформація з джерел, зокрема вже й апробована, наприклад [9, 10].

Отже, аналіз останніх публікацій, а саме порядку визначення просторово-часових бойових можливостей підрозділів РЕБ та БпС щодо виконання завдань за призначенням, показав наявність певних результатів досліджень, близьких до цієї тематики, але вони є фрагментарними та не містять цілісного підходу до вирішення визначеного науково-практичного завдання.

Проте показник можливостей вказаних ВВП, що застосовуються на стадії задум, який доцільно використовувати для формування задуму БпАК як сукупності безпілотних перешкодостійких засобів за результатами аналізу тенденції розвитку збройної боротьби, розкрито недостатньо.

Формулювання завдання дослідження. За сучасних умов є необхідність удосконалення апарату порядку підготовки вихідних даних для формування раціональних варіантів ударних (РУ) БпАК із урахуванням того, що він може бути реалізованим із використанням показника можливостей сил та засобів РЕБ противника (зони РЕПр об'єкта цілі), сформованого за результатами аналізу тенденції розвитку збройної боротьби та прийнятних умов, обмежень, припущень і порядку оцінювання їх на стадії задум.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення сформульованого завдання дослідження приймаємо такі положення. Вітчизняним аналогом задуму є прекоцепція та роботи, пов'язані з реалізацією державних цільових програм і розробленням оперативно-стратегічних, оперативно-тактичних, тактико-технічних вимог до перспективних виробів ОВТ [11]. Отже, на стадії задум або для формування оперативно-тактичних і тактико-технічних вимог до ВВП потрібна модель визначення їх просторових можливостей, яка дозволить перейти від вербального опису основних потрібних властивостей до їх кількісного подання для визначення прогнозованої ефективності. Така модель, відповідно до [12], допоможе більш ретельно визначити вимоги до бойових можливостей зразків (комплексів, систем) ОВТ, а щодо ударних (РУ) БпАК – способи й умови РЕБ виконання ним завдань, а також кількісні значення показників, які характеризують бойові можливості й особливості бойового застосування цих зразків ОВТ.

Із використанням [12] можна визначити, що показниками бойових можливостей сил і засобів РЕБ, як і БпС, є кількісні та якісні характеристики можливостей відповідних частин щодо виконання покладених на них завдань.

Вважаємо, що для формування вимог до можливостей зразків повинні бути визначальними просторові показники бойових спроможностей, оскільки вони

реалізуються енергетичними можливостями, показники яких формуються, як такі, що забезпечують просторові.

Зауважимо, що в цьому дослідженні автори пропонують уточнення до визначень просторових показників можливостей, наданих нормативними документами [13–17], у яких поняття “зона” визначають у такий спосіб: “Ділянка місцевості або частина повітряно-космічного (морського) простору” чи “ділянка простору (або її проєкція на земну поверхню)”.

У цій статті для усунення неоднозначності тлумачень пропонуємо розрізняти та розуміти таке:

показником можливості дій військ (сил) (фізичні процеси), що проводяться (формується) в повітряно-космічному просторі (повітрі) (випромінювання електромагнітних хвиль, політ БпЛА тощо), є область;

показником можливості дій “на землі” (проєкція на земну поверхню, ортодроми) визначаємо зону.

Тому в цій роботі розуміємо:

зона РЕПр об’єкта від ударних (РУ) БпАК (БпЛА) (далі – зона РЕПр) – проєкція на земну поверхню області (ділянки) простору, у межах якої зразками техніки РЕБ для прикриття об’єкта (об’єктів) забезпечується подавлення радіоелектронних засобів (РЕЗ) БпЛА-цілей з ефективністю, не менше заданої;

зона дій (удару, розвідки, коригування тощо) по об’єкту ударних (РУ) БпАК (БпЛА) (зона БпЛА) – проєкція на земну поверхню області (ділянки) простору, у межах якої БпЛА, що здійснюють політ на певній висоті, забезпечується виконання цільових завдань по об’єкту з ефективністю, не менше заданої;

зона дії засобу (ЗДЗ) РЕБ по БпЛА – проєкція на земну поверхню області (ділянки) простору, у межах якої технікою (засобами) РЕБ забезпечується подавлення з ефективністю, не менше заданої, РЕЗ БпЛА-цілей, що здійснюють політ на певній висоті.

Приймаємо, що зону РЕПр можна визначати за розмірами: потрібна, яка відповідає просторовим розмірам об’єкта РЕПр (див. рис. 1–2); наявна, яку оцінюємо за параметрами ЗДЗ РЕБ.

ЗДЗ по БпЛА (кругова для зразка техніки РЕБ із напівсферичною (“купольною”) областю) – круг, що умовно утворюється на земній поверхні (будується на топографічній карті) із центром у місці розташування засобу та радіусом $R_{зд}$, у межах якого засіб (зразок техніки) РЕБ забезпечує РЕПр об’єктів (позицій військ (сил)) від дій по них цього БпЛА з потрібним ступенем ефективності (потрібна точність викриття БпЛА, необхідний коефіцієнт подавлення).

Розмір ЗДЗ по БпЛА визначається радіусом $R_{зд}$ (ортодроми) – дальністю по землі, що розраховується з використанням значень $R_{нд}$ та $H_{БпЛА}$:

$$R_{зд} = \sqrt{R_{нд}^2 - H_{БпЛА}^2}.$$

Оскільки запропоновані зони є моделлю з певним описом реальних фізичних процесів, вважаємо технічні характеристики засобів основним чинником, яким

визначаються кількісні значення їх можливостей щодо розмірів простору їх дій за призначенням. До зони БпЛА та зони РЕБ не повинні входити ділянки, де потужність сигналу радіолінії станції контролю й коригування (СКК) БпЛА є меншою, ніж чутливість бортового приймача чи перешкоди, щодо приймача, який подавляється. Відомо [18], що на розповсюдження радіохвиль, які випромінюють РЕЗ БпЛА, так само, як РЕЗ зразків техніки РЕБ, суттєво впливає рельєф місцевості в районах бойового застосування відповідних підрозділів.

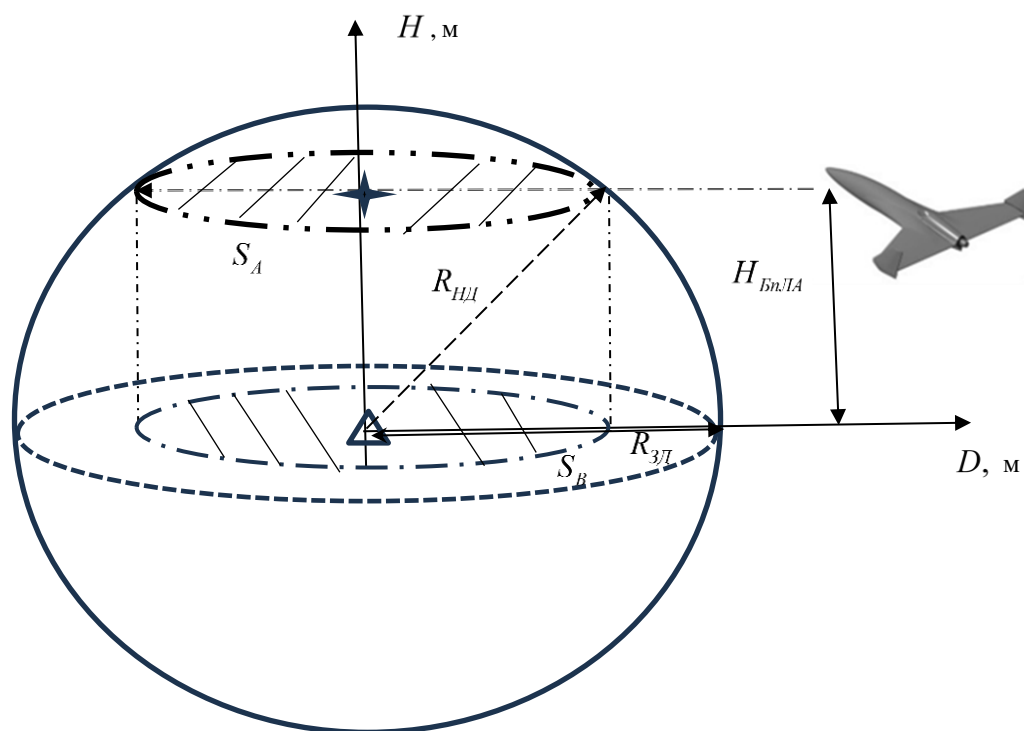


Рис. 1. Зона дії засобу РЕБ по БпЛА, що здійснює політ в області його дії на певній висоті: $H_{\text{БпЛА}}$ – висота польоту БпЛА, м; $R_{\text{нд}}$ – нахильна дальність від точки місця положення засобу РЕБ до точки входження БпЛА в зону його дії; S_A – кругова площа перетину області дії засобу РЕБ на висоті $H_{\text{БпЛА}}$; S_B – зона дії засобу РЕБ по БпЛА (проекція кругової площі перетину області дії засобу РЕБ на висоті $H_{\text{БпЛА}}$); $R_{\text{зд}}$ – радіус зони дії засобу РЕБ по БпЛА

Приймаємо, що рельєф України переважно рівнинний (95% площі країни) з невеликими абсолютними висотами (низовини становлять 70% території, височини – 25%). На етапі планування застосування підрозділів знання особливостей рельєфу повинні обов'язково враховуватися (є сучасні геоінформаційні технології та програмно реалізовані продукти для визначення зон радіовидимості зокрема).

У цьому разі потрібне проведення порівняно нескладних розрахунків і розроблення практичних методик для цього, що не викривляють тактичний зміст і фізику процесів застосування БпЛА і засобів РЕБ, які досліджуються.

Щодо формування задуму ударного (РУ) БпЛА, призначеного для ураження конкретних наземних об'єктів, що знаходяться в зоні РЕПр, яка утворюється зразком

техніки РЕБ купольного типу (ближньої дії), розглянемо на прикладі БПАК першого класу з БПЛА зі скиданням для ураження об'єктів типу взводний опорний пункт (ВОП) [19].

Вихідні дані

Відомо:

для РЕПр ВОП від ударів БПАК із використанням БПЛА зі скиданням застосовують зразок техніки РЕБ;

областю дії зразка техніки РЕБ є верхня напівсфера з такими розмірами:

за азимутом $\beta_{ОД РЕБ} = (0...360)^\circ$; за кутом місця $\varepsilon_{ОД РЕБ} = (0...90)^\circ$;

радіус області дії зразка техніки РЕБ, який дорівнює оголошеній, як правило, дальності (ортодроми) РЕПр: $R_{ОД РЕБ} = D_{РЕПр} = 300$ м.

Потрібно: визначити просторові можливості ударного (РУ) БПАК із використанням БПЛА зі скиданням (висоту польоту під час скидання) по ВОП, що знаходиться в зоні РЕПр позиції ВОП, яка утворюється таким зразком техніки РЕБ.

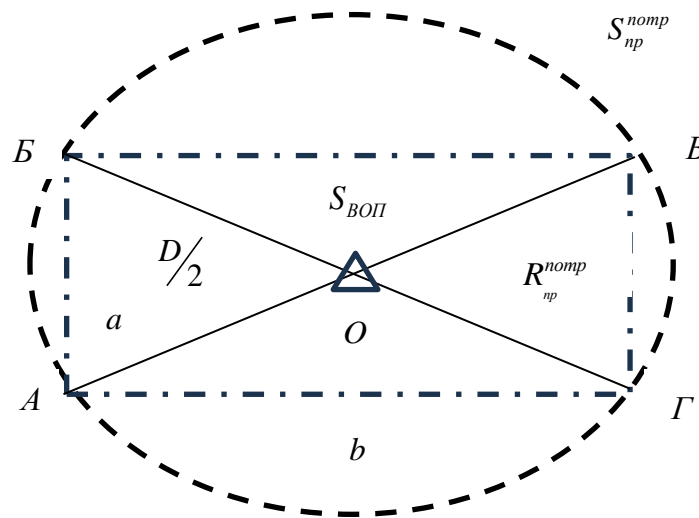


Рис. 2. Потрібна зона РЕПр:

S_{np}^{nomp} – потрібна площа для РЕПр бойового порядку (військового об'єкта), що має площу $S_{VOП}$, зразком техніки РЕБ, розміщеним у точці O

Порядок визначення

1. Визначаємо розмір – радіус площі, потрібної для РЕПр ВОП:

1.1 приймаємо, що за [20] ВОП розташовується на площі розміром 300×400 м;

1.2 обчислюємо радіус кола, що описує прямокутник ВОП, де $\frac{D}{2}$ – половина його діагоналі:

$$R_{np}^{nomp} = \frac{\sqrt{300^2 + 400^2}}{2} = 250 \text{ м.}$$

2. Порівнюємо розрахований розмір радіуса площі, потрібної для РЕПр ВОП, $R_{np}^{nomp} = 250$ м із відомим значенням радіуса області дії зразка техніки РЕБ, який дорівнює оголошеній дальності (ортодроми) РЕПр, а саме $R_{ОД РЕБ} = D_{РЕПр} = 300$ м:

2.1 порівнюємо $R_{np}^{nomp} \prec R_{OD\ РЕБ}$;

2.2 робимо висновок: зразок техніки РЕБ (певним чином*) забезпечує потрібну зону РЕПр ВОП, оскільки** $R_{OD\ РЕБ} = 300$ м перевищує на 50 м*** R_{np}^{nomp} (*без урахування висоти польоту БпЛА, з якої роблять скидання боєприпасу; ** без урахування: радіуса ураження боєприпасу, що скидають; некерованого польоту БпЛА після його подавлення; *** як правило, є вимога перевищення на 100 м).

3. Визначаємо висоту польоту БпЛА, у нашому прикладі граничну $H_{БпЛА}^{cp}$ – початкову висоту польоту, з якої вже можливе (вертикальне) скидання боєприпасів по елементах ВОП, без заходу в область дії РЕПр зразка техніки РЕБ:

$$H_{БпЛА}^{cp} = \sqrt{R_{HD}^2 - R_{np}^{nomp^2}},$$

$$H_{БпЛА}^{cp} = \sqrt{R_{OD\ РЕБ}^2 - R_{ВОП}^2} = \sqrt{300^2 - 250^2} = \sqrt{27500} = 165,8 \text{ м.}$$

4. Проводимо аналіз отриманих результатів:

на висотах польоту до $H_{БпЛА}^{cp} = 165,8$ м не можливе (вертикальне) скидання боєприпасів по елементах ВОП без заходу в область дії РЕПр зразка техніки РЕБ;

починаючи з висоти польоту $H_{БпЛА}^{cp} = 165,8$ м, частково**** можливе (вертикальне) скидання боєприпасів по елементах ВОП без заходу в область дії РЕПр зразка техніки РЕБ;

(****частка площі (кількість елементів) ВОП, що потенційно підпадає до зони ураження, збільшується зі зростанням висоти польоту БпЛА);

у діапазоні висот ($300 \text{ м} \succ H_{БпЛА} \succ 165,8 \text{ м}$) площа зони (радіус) РЕПр зменшується, відповідно, потенційна площа зони ураження збільшується;

із висоти польоту $H_{БпЛА} \geq 300$ м потенційна площа зони ураження перекриває (перевищує) площу зони РЕПр.

5. Отримуємо вимогу до технічних характеристик. Задум ударного (РУ) БпАК першого класу з БпЛА зі скиданням для ураження об'єктів типу ВОП, що може знаходитися в зоні РЕПр, яка утворюється зразком техніки РЕБ купольного типу (ближньої дії), повинен враховувати потребу технічної можливості виконання ним завдань (ураження боєприпасами) із висоти здійснення скидання не менше 166 м.

Отримана зона РЕПр за розмірами (у нашому випадку за радіусом) визначається нахильною дальністю подавлення, яка забезпечується енергетичними характеристиками зразка техніки РЕБ та висотою польоту БпЛА, що здійснюється на певній нахильній дальності від СКК, пульта управління, яка також оцінюється за енергетичними характеристиками.

Подальше розроблення задуму ударного (РУ) БпАК вимагає продовження підготовки вихідних даних.

Оцінювання співвідношення енергетичних характеристик сигналів управління і перешкоди, які надходять до РЕЗ БпЛА для формування варіантів задуму ударного (РУ)

БпАК першого класу з БпЛА зі скиданням, що забезпечує досягнення прийнятної результативності його ударних дій по бойовому порядку підрозділу у ВОП та його РЕПр, необхідно проводити разом із фахівцями БпАК та РЕБ:

визначення можливих варіантів взаємного розташування елементів БпАК, потрібного для виконання завдань удару, і зразка техніки РЕБ для РЕПр, а також розрахунок їх взаємного віддалення з апроксимацією на плані (нанесенням на робочу карту) граничного положення БпЛА відносно пульта управління і зразка техніки БпЛА;

обчислення за взаємним віддаленням втрат потужності в радіолініях пульт управління – БпЛА і зразок техніки РЕБ – БпЛА за формулою для розрахунку коефіцієнта зменшення потужності за фіксованою частотою випромінювання, а також визначення потужностей сигналу управління та перешкоди на приймальних антенах БпЛА за технічними характеристиками відповідних передавачів й антенних систем;

розрахунок співвідношення сигналів управління та перешкоди на приймальних антенах БпЛА (коефіцієнтів управління й подавлення);

визначення можливих варіантів реалізації потрібних значень показників просторових можливостей БпАК (ударів БпЛА) за їх технічними параметрами (характеристиками).

Висновки. За результатами аналізу тенденцій розвитку збройної боротьби запропоновано набуття необхідних спроможностей для вогневого ураження противника реалізовувати шляхом створення ударних (РУ) БпАК як сукупності спроможностей противника з РЕПр власних об'єктів від повітряної розвідки і прицільних ударів із повітря з урахуванням характеристик засобів РЕБ.

Розв'язанням порушеної проблеми, обумовленої недосконалістю науково обґрунтованого апарату формування задуму ударного (РУ) БпАК, є врахування особливостей прогнозованого РЕПр противником об'єкта від ударів з повітря ударним (РУ) БпЛА зі скиданням.

Практичний зміст запропонованого полягає в тому, що з'являється можливість отримувати опорні варіанти задуму ударного (РУ) БпАК, що застосовується в прогнозованих умовах РЕБ.

Впровадження запропонованого порядку забезпечує вдосконалення процесу розроблення оперативно-тактичних вимог до конкретних ударних (РУ) БпАК на стадії їх ЖЦ задум.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ В 15.004:2022. Система розроблення і поставлення на виробництво озброєння та військової техніки. Стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки. Чинний від 2022-26-12. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2022. 28 с.
2. Про затвердження Порядку проведення випробувань та прийняття на озброєння (постачання) зразків озброєння, військової та спеціальної техніки, засобів і обладнання іноземного виробництва : постанова Кабінету Міністрів України від 17.02.2021. № 159 (станом на 09.04.2024). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 09.06.2025).

3. Єдиний перелік (Каталог) спроможностей Міністерства оборони України, Збройних Сил України та інших складових Сил оборони, затверджений Міністром оборони України 31.12. 2021. URL: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/02/2_%D0%92%D0%9F-5-00196.01-%D0%84%D0%94%D0%98%D0%9D-%D0%9F%D0%95%D0%A0%D0%9A%D0%90%D0%A2-%D0%A1%D0%9F%D0%A0%D0%9C-%D0%9C%D0%9E%D0%A3-%D0%97%D0%A1%D0%A3-%D0%A2%D0%90-%D0%86%D0%A1%D0%A1%D0%9E.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
4. Горбулін В., Мосов С. Тенденції дронізації в Україні на сучасному етапі // Вісник НАН України. 2024. № 12. С. 40–48. <https://doi.org/10.15407/visn2024.12.040>
5. Концептуальні погляди щодо розвитку та застосування роботизованих систем у Збройних Силах України (концепція, завдання, класифікація, система управління, виклики щодо застосування, перспективи) / О. Семененко, А. Ремез, В. Мусієнко, І. Мутринич // Journal of Scientific Papers Social development & Security. June 2023. № 13 (3). Р. 24–42. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.2>
6. Методи моделювання бойових дій військ (сил) : навч. посіб. / Т. П. Пащенко, С. А. Микусь, В. Г. Солонніков та ін. Київ : НУОУ, 2021. 262 с.
7. Даник Ю. Г., Шестаков В. І. Особливості розвитку та удосконалена класифікація розвідувально-ударних комплексів // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2017. Т. 30, № 3. С. 126–136 <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2017-30-3-126-136>
8. ОП 3-0(46) Доктрина. Застосування безпілотних систем у Силах оборони України, затвердж. Головнокомандувачем ЗС України 01.01.2024. Київ : ГШ ЗС України, 2024. 56 с.
9. Іщенко Д. А., Стрінада В. В. Порядок підготовки формування задуму розвідувально-ударного комплексу за результатами аналізу тенденції розвитку збройної боротьби // Міжнар. наук.-практ. конф. "Всеохоплююча оборона: досвід протидії збройній агресії російської федерації проти України": зб. тез доп. Київ : НУОУ, 2024. С. 34–41.
10. Іщенко Д. А., Стрінада В. В., Левченко О. В. Методичний підхід до формування задуму розвідувально-ударного комплексу за результатами аналізу тенденцій збройної боротьби // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. 2024. Вип. 26 (I). С. 107–121. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.09>
11. Про затвердження Інструкції з формування оперативно-стратегічних, оперативно-тактичних та загальних вимог до перспективних (нових, модернізованих) систем (комплексів, зразків) озброєння та військової техніки Збройних Сил України : наказ Головнокомандувача ЗС України від 28.08.2020 № 127. Київ : ГШ ЗС України, 2020. 13 с.
12. ВКДП 3-(06,07,46).03.01. Тимчасове керівництво з бойової роботи підрозділів безпілотних авіаційних комплексів ракетних військ і артилерії Збройних Сил України / Ракетні війська і артилерія Сухопутних військ Збройних Сил України спільно з Національною академією сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. Київ, 2019. 96 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1lyk9D5JaKw0IFvrQ9fERN6HZ_r60lhSe/view (дата звернення: 22.06.2025).
13. ВСТ 01.101.001-2020(03). Воєнна розвідка. Військова розвідка. Терміни та визначення. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_945_28878436.pdf (дата звернення: 21.06.2025).

14. ВСТ 01.114.002-2023 (01). Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба в повітряних операціях. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_1212_22364672.pdf (дата звернення: 21.06.2025).
15. ВСТ 01.101.006. Воєнна розвідка. Військова розвідка. Терміни та визначення. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_945_28878436.pdf (дата звернення: 21.06.2025).
16. ВСТ 01.101.003. Воєнна розвідка. Радіоелектронна розвідка. Терміни та визначення. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_950_11853933.pdf (дата звернення: 22.06.2025).
17. ВСТ 602.001-2024 (01). Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба. Терміни та визначення. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_1212_22364672.pdf (дата звернення: 21.06.2025).
18. Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба в повітряних операціях. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_1212_22364672.pdf (дата звернення: 21.06.2025).
19. Побудова спеціалізованого шару параметрів рельєфу місцевості у геоінформаційній системі для планування дій в умовах радіоелектронної боротьби / М. Ф. Пічугін, Д. А. Іщенко, В. А. Кирилук, Я. М. Кожушко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2020. Вип. 3 (40). С. 124–131. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.14>
20. Завдання і бойовий порядок підрозділів в обороні. URL: <https://buklib.net/books/37547/> (дата звернення: 24.06.2025).

Стаття надійшла до редакції 25.07.2025.

REFERENCES

1. DSTU V 15.004:2022. *Systema rozroblennia i postavlennia na vyrobnytstvo ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Stadii zhyttievoho tsykladu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [System for the Development and Delivery of Weapons and Military Equipment. Stages of the Life Cycle of Weapons and Military Equipment]*. (2022). Kyiv. [in Ukrainian].
2. *Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia vyprobuvan ta pryiniattia na ozbroiennia (postachannia) zrazkiv ozbroiennia, viiskovoi ta spetsialnoi tekhniky, zasobiv i obladnannia inozemnoho vyrobnytstva : postanova Kab. Ministriv Ukrainy vid 17.02.2021 № 159 (stanom na 09.04.2024) [On Approval of the Procedure for Testing and Adoption (Supply) of Samples of Weapons, Military and Special Equipment, Means and Equipment of Foreign Production: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 17.02.2021 № 159 (as of 09.04.2024)]*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/159-2021-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
3. *Yedynyi perelik (Kataloh) spromozhnostei Ministerstva oborony Ukrainy, Zbroinykh Syl Ukrainy ta inshykh skladovykh Syl oborony, zatverdzhenyi Ministrom oborony Ukrainy 31.12.2021 [The Unified List (Catalog) of the Capabilities of the Ministry of Defence of Ukraine, the Armed Forces of Ukraine and other components of the Defence Forces was approved by the Minister of Defence of Ukraine on 31.12.2021]*. (2021). Retrived from https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/02/2_%D0%92%D0%9F-5-00196.01-%D0%84%D0%94%D0%98%D0%9D-%D0%9F%D0%95%D0%A0%D0%9A%D0%90%D0%A2-%D0%A1%D0%9F%D0%A0%D0%9C-%D0%9C%D0%9E%D0%A3-%D0%97%D0%A1%D0%A3-%D0%A2%D0%90-%D0%86%D0%A1%D0%A1%D0%9E.pdf [in Ukrainian].

4. Horbulin, V., & Mosov, S. (2024). Tendentsii dronizatsii v Ukraini na suchasnomu etapi [Trends in Droneization in Ukraine at the Present Stage]. *Visnyk NAN Ukrainy [Bulletin of the NAS of Ukraine]*, 12, 40–48. <https://doi.org/10.15407/visn2024.12.040>
5. Semenenko, O., Remez, A., Musienko, V., & Mutrynych, I. (2023). Kontseptualni pohliady shchodo rozvytku ta zastosuvannia robotyzovanykh system u Zbroinykh Sylakh Ukrainy (kontseptsiiia, zavdannia, klasyfikatsiia, systema upravlinnia, vyklyky shchodo zastosuvannia, perspektyvy) [Conceptual Views on the Development and Application of Robotic Systems in the Armed Forces of Ukraine (Concept, Tasks, Classification, Control System, Challenges in Application, Prospects)]. *Journal of Scientific Papers Social development & Security*, 13 (3), 24–42. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.2>
6. Pashchenko, T. P., Mykus, S. A., & Solonnikov, V. H. et al. (2021). *Metody modeliuвання boiovykh dii viisk (syl) [Methods of Modeling Combat Operations of Troops (Forces)]*. Kyiv [in Ukrainian].
7. Danyk, Yu. H., Shestakov, V. I. (2017). Osoblyvosti rozvytku ta udoskonalena klasyfikatsiia rozvidualno-udarnykh kompleksiv [Peculiarities of Development and Improved Classification of Reconnaissance and Shock Complexes]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony [Modern Information Technologies in the Field of Security and Defense]*, 30, 3, 126–136. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2017-30-3-126-136> [in Ukrainian].
8. *OP 3-0(46) Doktryna. Zastosuvannia bezpilotnykh system u Sylakh oborony Ukrainy, zatverdzh. Holovnokomanduvachem ZS Ukrainy 01.01.2024 [Doctrine. Application of Unmanned Systems in the Defense Forces of Ukraine, approved by the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine 01.01.2024]*. (2024). Kyiv [in Ukrainian].
9. Ishchenko, D. A., Strinada, V. V. (2024). Poriadok pidhotovky formuvannia zadumu rozvidualno-udarnoho kompleksu za rezultatamy analizu tendentsii rozvytku zbroinoi borotby [The Procedure for Preparing the Formation of a Concept of a Reconnaissance and Strike Complex Based on the Results of the Analysis of the Development Trend of Armed Struggle]. In *Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Vseokhopliiucha oborona: dosvid protydii zbroinii ahresii rosiiskoi federatsii proty Ukrainy": zb. tez dop. [International Scientific and Practical Conference "Comprehensive Defense: Experience in Countering the Armed Aggression of the Russian Federation Against Ukraine": collection of abstracts]*. (pp. 34–41). Kyiv [in Ukrainian].
10. Ishchenko, D. A., Strinada, V. V., Levchenko, O. V. (2024). Metodychnyi pidkhid do formuvannia zadumu rozvidualno-udarnoho kompleksu za rezultatamy analizu tendentsii zbroinoi borotby [Methodical Approach to the Formation of the Idea of the Reconnaissance and Strike Complex Based on the Results of the Analysis of the Trend of Armed Struggle]. *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), 107–121. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.09> [in Ukrainian].
11. *Pro zatverdzhennia Instruksii z formuvannia operatyvno-stratehichnykh, operatyvno-taktychnykh ta zahalnykh vymoh do perspektyvnykh (novykh, modernizovanykh) system (kompleksiv, zrazkiv) ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Zbroinykh Syl Ukrainy : nakaz Holovnokomanduvacha ZS Ukrainy vid 28.08.2020 № 127 [On Approval of the Instruction on*

the Formation of Operational-Strategic, Operational-Tactical and General Requirements for Advanced (New, Modernized) Systems (Complexes, Samples) of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine: Order of the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine of August 28, 2020 № 127]. Kyiv [in Ukrainian].

12. VKDP 3-(06,07,46).03.01. *Tymchasove kerivnytstvo z boiovoi roboty pidrozdiliv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv raketnykh viisk i artylerii Zbroinykh Syl Ukrainy [Temporary Leadership for Combat Work of Unmanned Aviation Complexes of the Missile Forces and Artillery of the Armed Forces of Ukraine].* (2019). Raketni viiska i artyleria Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy spilno z Natsionalnoiu akademiieiu sukhoputnykh viisk im. hetmana Petra Sahaidachnoho [Missile Forces and Artillery of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine Together with the National Academy of the Ground Forces named after Hetman Petro Sahaidachny]. Retrived from https://drive.google.com/file/d/1lyk9D5JaKw0lFvrQ9fERN6HZ_r60lhSe/view [in Ukrainian].

13. VST 01.101.001-2020(03). *Voienna rozvidka. Viiskova rozvidka. Terminy ta vyznachennia [War Intelligence. Military Intelligence. Terms and Definitions].* Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_945_28878436.pdf [in Ukrainian].

14. VST 01.114.002-2023 (01). *Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba v povitrianykh operatsiakh [Electromagnetic and Cyber Warfare. Electronic Warfare in Air Operations].* Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_1212_22364672.pdf [in Ukrainian].

15. VST 01.101.006. *Voienna rozvidka. Viiskova rozvidka. Terminy ta vyznachennia [War Intelligence. Military Intelligence. Terms and Definitions].* Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_945_28878436.pdf [in Ukrainian].

16. VST 01.101.003. *Voienna rozvidka. Radioelektronna rozvidka. Terminy ta vyznachennia [Military intelligence. Radioelectronic intelligence. Terms and definitions].* Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_950_11853933.pdf [in Ukrainian].

17. 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_1212_22364672.pdf [in Ukrainian].

18. *Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba v povitrianykh operatsiakh [Electromagnetic and Cyber Warfare. Electronic Warfare in Air Operations].* (n.d.). Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_1212_22364672.pdf [in Ukrainian].

19. Pichuhin, M. F., Ishchenko, D. A., Kyrlyiuk, V. A., & Kozhushko, Ya. M. (2020). *Pobudova spetsializovanoho sharu parametriv reliefu mistsevosti u heoinformatsiinii systemi dlia planuvannia dii v umovakh radioelektronnoi borotby [Construction of a Specialized Layer of Terrain Parameters in a Geographic Information System for Planning Actions in Electronic Warfare Conditions].* *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine]*, 3 (40), 124–131. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.14> [in Ukrainian].

20. *Zavdannia i boiovyi poriadok pidrozdiliv v oboroni [Tasks and Combat Order of Units in Defense].* (n.d.). Retrived from <https://buklib.net/books/37547/> [in Ukrainian].

D. A. Ishchenko, V. V. Strinada

FORMING THE CONCEPT OF STRIKE UNMANNED AERIAL COMPLEX TAKING INTO ACCOUNT THE FORECASTED RADIOELECTRONIC COVERAGE OF THE OBJECT FROM AIR STRIKES

According to the analysis of trends in the development of armed struggle regarding the use of reconnaissance-strike (fire) unmanned aerial complexes and their effectiveness in conditions of electronic warfare, the necessity of improving the scientifically grounded procedure for the formation of the plan of such weapon systems and military equipment has been demonstrated, taking into account the projected electronic protection of the object from air strikes.

A direct dependence of the effectiveness of strike (reconnaissance-strike) unmanned aerial systems on the enemy's capabilities for radio-electronic protection of designated targets against aerial reconnaissance and precision strikes from the air has been established, which is determined by the characteristics of electronic warfare systems. The proposed indicator is the zone of electronic coverage of the ground object, which allows for a predictable indirect assessment of the spatial capabilities of the unmanned aerial complex for delivering precision strikes from the air on specified objects. An example is provided for the procedure of determining such a zone using the graphical analytical method based on projected spatial indicators (range, altitude), which depend on the energy characteristics of the corresponding radio electronic means of the unmanned aerial complex and the sample of electronic warfare equipment.

It has been proposed to use the indicator of the opponent's capabilities regarding electronic countermeasures against airstrikes when preparing data for the formation of the 'concept' of the reconnaissance-strike complex, as a set of unmanned interference-resistant means based on the analysis of trends in the development of armed struggle.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; radio electronic protection zone of the object; electronic warfare; reconnaissance-strike complex; capability; stage of the life cycle of a weapon and military equipment product concept.*

Автори випуску

Антонюк Андрій Володимирович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0009-9880-0033.

Наукові інтереси:

- дослідження впливу параметрів конструкцій повітряних ЛЕП на коефіцієнт підсилення та спектральні характеристики випромінювання;
- аналіз ролі інтерференційних ефектів і впливу характеристик земної поверхні на діаграми спрямованості антенних систем.

Білоус Костянтин Миколайович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 00009-0004-2603-9488

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;
- управління в складних технічних системах.

Бондаренко Юрій Леонідович – кандидат технічних наук, начальник факультету Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-0395-4275

Наукові інтереси:

- оптимізація функціонування складних технічних систем;
- інформаційні технології багатокритерійної оптимізації систем та об'єктів;
- створення нових та удосконалення наявних систем електрозабезпечення.

Бугайов Микола Вікторович – кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник начальника науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-0899-9843

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Гаврилюк Микола Петрович – інженер відділення перспективного розвитку Окремого спеціального центру електронної підтримки Командування Сухопутних військ Збройних Сил України.

Наукові інтереси:

- методи підвищення ефективності засобів пеленгації;
- безпілотні системи.

Гуменюк Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-5853-3238

Наукові інтереси:

- методи і засоби захисту інформації;
- кібербезпека;
- комп'ютерні мережі та компоненти.

Жураківський Богдан Михайлович – кандидат фізико-математичних наук, викладач кафедри Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID: 0009-0002-3620-338X

Наукові інтереси:

- математична статистика та теорія ймовірностей.

Зімчук Ігор Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0003-9372-5720
Наукові інтереси:

– синтез алгоритмів оцінювання та управління для автоматизованих технічних систем.

Іваненко Олександр Григорович – інженер відділення перспективного розвитку Окремого спеціального центру електронної підтримки Командування Сухопутних військ Збройних Сил України.

Наукові інтереси:

– методи оцінювання ефективності та техніко-економічного аналізу;
– методи аналізу великих даних.

Іщенко Дем'ян Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-9743-3889

Наукові інтереси:

– дослідження складних інформаційних систем;
– моделювання операцій.

Каптур Вадим Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник відділення перспективного розвитку Окремого спеціального центру електронної підтримки Командування Сухопутних військ Збройних Сил України. ORCID: 0000-0003-4200-1151

Наукові інтереси:

– телекомунікаційні системи та мережі;
– інформаційно-комунікаційні системи електронної підтримки;
– методи оцінювання ефективності та техніко-економічного аналізу.

Могилянець Тетяна Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри Військової академії (м. Одеса). ORCID: 0000-0003-0362-9907

Наукові інтереси:

– прикладна механіка в озброєнні та військовій техніці;
– геометричне моделювання технічних форм та автоматизація їх проектування.

Нагорнюк Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-7680-7201

Наукові інтереси:

– методи цифрової обробки та розпізнавання радіосигналів; методи радіопеленгації;
– проектування та дослідження антен.

Наумчак Леонід Михайлович – науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-7311-6659

Наукові інтереси:

– космічні та геоінформаційні системи;
– математичні методи й алгоритми оброблення видової інформації.

Автори випуску

Омельчук Ігор Анатолійович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-4674-0058

Наукові інтереси:

- вимірювальні системи;
- безпілотні літальні апарати;
- системи автоматичного керування.

Охрімчук Володимир Васильович – кандидат технічних наук, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-7518-9993

Наукові інтереси:

- кібербезпека;
- мережеві технології;
- інформаційні технології.

Охрімчук Інна Антонівна – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0009-2314-1723

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- автоматизоване оброблення інформації;
- комп'ютерна графіка.

Петраш Сергій Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0005-2757-5108.

Наукові інтереси:

- аналіз ролі інтерференційних ефектів і впливу характеристик земної поверхні на діаграми спрямованості антенних систем;
- якісне пояснення механізмів зміни інтенсивності ліній PLHR залежно від частоти, геометрії та енергетичних характеристик ЛЕП.

Пількевич Ігор Анатолійович – заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-5064-3272

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних систем та процесів;
- боротьба в електромагнітному середовищі;
- кіберзахист.

Поздняков Володимир Васильович – ад'юнкт штатний науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0004-6382-0935

Наукові інтереси:

- математичні методи та алгоритми оброблення сигналів.

Пулеко Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-8875-017X

Наукові інтереси:

- моделювання та обробка інформації в складних технічних системах;
- інформаційні технології в управлінні групами розподілених динамічних об'єктів;
- штучний інтелект в технічних системах;
- інтернет речей.

Радущинський Олександр Павлович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0002-0381-052X

Наукові інтереси:

- інформаційні технології радіозв'язку.

Ревенко Володимир Борисович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-2358-5983

Наукові інтереси:

- системи автоматизованого керування;
- роботизовані системи.

Рибчинський Дмитро Андрійович – ад'юнкт штатний науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0002-2624-9229

Наукові інтереси:

- застосування безпілотних авіаційних комплексів;
- інформаційні системи;
- протидія технічним засобам розвідки.

Рихальський Олександр Ростиславович – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0005-2757-5108

Наукові інтереси:

- дослідження впливу параметрів конструкцій повітряних ЛЕП (геометрії, класу напруги, висоти підвісу) на коефіцієнт підсилення та спектральні характеристики випромінювання;
- вивчення умов формування мультиплетів гармонік у спектрах PLHR і їх залежності від густини енергії поля електромереж.

Романчук Микола Петрович – кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник начальника наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-0087-8994

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення видової інформації;
- космічні та геоінформаційні системи.

Свистунович Іван Володимирович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0004-6832-6397

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних технічних систем;
- дослідження систем електропостачання та релейного захисту.

Автори випуску

Скорецький Максим Сергійович – начальник управління радіоелектронної та кіберборотьби Командування Сухопутних військ Збройних Сил України.

Наукові інтереси:

- методи підвищення ефективності засобів радіоелектронної боротьби;
- інформаційно-комунікаційні системи електронної підтримки.

Сокульський Олег Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут. ORCID: 0000-0003-3853-9928

Наукові інтереси:

- інтернет речей;
- функціонально-стійкі системи з керуванням, яке відновлюється;
- інтелектуальні транспортні системи;
- оптимізація функціонування складних технічних систем;
- дослідження етапів життєвого циклу озброєння та військової техніки.

Ступак Дмитро Євгенійович – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-7638-3982

Наукові інтереси:

- теорія і методика професійної освіти у вищій школі;
- професійна компетентність фахівця;
- дослідження шляхів підвищення ефективності систем електропостачання.

Стрінада Віктор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-0604-7673

Наукові інтереси:

- безпілотні системи та комплекси;
- математичне моделювання складних технічних систем.

Танцюра Максим Вікторович – кандидат фізико-математичних наук, викладач кафедри Національного авіаційного університету. ORCID: 0009-0005-0380-6936

Наукові інтереси:

- теорія випадкових процесів;
- комп'ютерний зір.

Тарасенко Владислав Олександрович – ад'юнкт штатний науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0005-6267-9455

Наукові інтереси:

- інформаційні технології радіозв'язку.

Топольськов Євгеній Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Київського національного університету імені Тараса Шевченка. ORCID: 0000-0001-5587-3069

Наукові інтереси:

- навігаційні технології;

- штучний інтелект;
- математичне моделювання складних технічних систем;
- дослідження етапів життєвого циклу озброєння та військової техніки..

Тимчук Сергій Віталійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-4096-9946

Наукові інтереси:

- комплекси та засоби радіоелектронної розвідки.

Трушков Герман Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Військової академії (м. Одеса). ORCID: 0000-0001-7851-6419

Наукові інтереси:

- прикладна механіка в озброєнні та військовій техніці;
- моделювання та параметризація.

Чумакевич Віктор Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-5773-393X

Наукові інтереси:

- функціонально-стійкі системи з керуванням, яке відновлюється;
- моделювання та спостереження геотехнічних процесів;
- математичне моделювання складних технічних систем;
- дослідження етапів життєвого циклу озброєння та військової техніки.

Шапар Тетяна Миколаївна – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0008-0497-7675

Наукові інтереси:

- синтез алгоритмів оцінювання та управління для автоматизованих технічних систем.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Збірник наукових праць

Випуск 28 (I)

Видавничий оригінал виготовлений
у науково-організаційному відділенні 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 11.09.2025. Формат 60 × 84 / 8
Ум. друк. арк. 22,79. Тираж 50 прим. Зам. 676 опер.

Друкарня ЖВІ

10004, м. Житомир, просп. Миру, 22