

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

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

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

29

Житомир
2025

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 29 / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2025. – 184 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29>

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 № 5 від 22.12.2025.

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 (Державний університет «Житомирська політехніка», Україна);

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

КОВБАСЮК С. В., лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, старший науковий співробітник (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., Клязника В. В., Оборонов М. І. Математичне моделювання процесу радіомоніторингу із використанням безпілотних літальних апаратів	4
Костира О. О., Гризо А. А., Пилипович О. М., Романенко І. О. Метод передспотворення фази для зниження рівня бічних пелюсток функції автокореляції сигналів із нелінійною частотною модуляцією	27
Дубина О. Ф., Соболенко С. О., Андрєєв О. В., Парфенюк В. Г., Гераймович О. В. Визначення реальної роздільної здатності цифрових зображень із використанням теорії нечіткої логіки	40
Пількевич І. А., Мірошніченко С. І., Жуков А. О., Нетребко Р. В. Модель інформаційної системи електронної бібліотеки закладів вищої освіти	52
Іщенко Д. А., Стрінада В. В., Марищук Л. М. Засади формування термінологічної та класифікаційної баз системи загальних технічних вимог до військової техніки високої динаміки розвитку	64
Тертишний Б. І., Нікітін А. А., Мещеряков І. С., Сампір О. М., Кенгерлі А. Г. Модель застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі за стандартами НАТО	79
Гончаренко Ю. П., Полещук І. І., Соколовський О. Ф., Яковенко В. А. Обґрунтування необхідності створення бюджетного іонозонда для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистеми	92
Бондаренко Ю. Л., Іщенко І. А. Аналіз систем живлення електродвигунів розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу	107
Романько В. А., Срібний О. М. Інтеграція нейронного фільтра Калмана в систему наведення високодинамічних апаратів	125
Мещеряков І. С., Нікітін А. А., Капля І. О., Залізко А. В., Буряк С. П. Модель застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні за стандартами НАТО	140
Андрощук Р. А., Гринюк Ю. В. Аналіз сигнатури акустичних сигналів прольоту крилатих ракет	152
Омельчук І. А., Токар А. М., Рикун А. М., Свистунович І. В. Використання статистичних методів для оцінювання результатів випробування безпілотних систем	164
Автори випуску	176

М. В. Бугайов, В. В. Клязника, М. І. Оборонов

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАДІОМОНІТОРИНГУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У зв'язку зі стрімкими темпами розвитку техніки радіозв'язку, упровадженням нових радіотехнологій, зростанням швидкостей передавання все більших обсягів інформації, потреба в радіочастотному спектрі загального користування з кожним роком суттєво зростає, тому особливу роль у процесі вдосконалення системи управління радіочастотним спектром відіграє радіомоніторинг. У великих містах зі щільною забудовою із багатоповерхових будівель ведення радіомоніторингу навіть із використанням портативних засобів досить ускладнене, а в деяких випадках практично не можливе. Застосування безпілотних літальних апаратів підвищує гнучкість просторового розміщення засобів радіомоніторингу та швидкість огляду заданої області простору, покращує енергетичну доступність джерел радіовипромінювання за рахунок можливості створення умов прямої видимості. Метою статті є розроблення математичних моделей процесу радіомоніторингу із використанням безпілотних літальних апаратів, що дозволить підвищити ефективність вирішення відповідних завдань в умовах багатопроменевих замирань за рахунок оптимізації методів та алгоритмів оброблення сигналів. У ході викладення основного матеріалу дослідження визначено завдання та складові процесу радіомоніторингу, описано параметри окремого джерела радіовипромінювання та їх сукупності в деякій області простору із використанням відповідних імовірнісних моделей, а також зазначено параметри засобу радіомоніторингу та середовища поширення радіохвиль. Показано, що планування траєкторії польоту безпілотного літального апарата повинно здійснюватися з урахуванням перешкод та апіорного розподілу щільності розміщення джерел радіовипромінювання в просторі. Наведено моделі прийнятого сигналу для їх вузькосмугових та широкосмугових описів. У разі моделювання процесу пошуку джерел радіовипромінювань доцільно окремо розглядати пошук сигналів у частотно-часовій області та в просторі.

Ключові слова: багатопроменеве замирання; безпілотний літальний апарат; джерело радіовипромінювання; математичне моделювання; радіомоніторинг.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Через швидкі темпи розвитку техніки радіозв'язку, впровадження нових радіотехнологій, зростання швидкостей передавання все більших обсягів інформації потреба в радіочастотному спектрі (РЧС) загального користування щороку стає нагальнішою. Постійне збільшення кількості радіоелектронних засобів (РЕЗ) призводить до перевантаження РЧС і ще більше ускладнює електромагнітну обстановку, погіршує електромагнітну сумісність між РЕЗ. Саме тому особливу роль у процесі вдосконалення системи управління РЧС відіграє радіомоніторинг (РМ), який

дозволяє визначати ефективність використання радіочастотного ресурсу, забезпечувати електромагнітну сумісність РЕЗ, які функціонують, а також виявляти джерела електромагнітних завад, незаконно діючого радіобладнання та інших джерел радіовипромінювання (ДРВ) [1–3].

Моніторинг РЧС організовують переважно із застосуванням стаціонарних і мобільних засобів. Портативні засоби застосовують для інструментального оцінювання параметрів радіовипромінювання РЕЗ під час проведення моніторингу спектра лише у виняткових випадках у тих місцях, де його реалізація із використанням інших технічних засобів не можлива, а також для уточнення результатів, отриманих із використанням мобільних комплексів РМ [4].

У великих містах зі щільною забудовою із багатоповерхових будівель ведення РМ навіть із застосуванням портативних засобів досить ускладнене, а іноді практично не можливе. Використання засобів РМ, розміщених на безпілотних літальних апаратах (БпЛА), відкриває нові можливості щодо вирішення завдань РМ, а саме підвищує гнучкість просторового розміщення засобу РМ та швидкість огляду заданої області простору, покращує енергетичну доступність ДРВ за рахунок можливості створення умов прямої видимості. Крім того, із використанням кількох БпЛА можна швидко розгортати мережі РМ та змінювати їх конфігурацію, що дозволить визначати положення ДРВ. Проте ефективне застосування БпЛА для виконання завдань РМ потребує вдосконалення відповідної математичної моделі процесу РМ, що буде враховувати ефекти, пов'язані із переміщенням БпЛА відносно ДРВ в умовах міської забудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням використання БпЛА для ведення РМ присвячено велику кількість теоретичних та прикладних досліджень. Зокрема, у роботах [5–8] описано процедури оптимізації траєкторії їх польоту для дослідження відомих ДРВ. У [9] наведено пропозиції щодо застосування БпЛА із засобами РМ для виявлення джерел радіоперешкод приймачам сигналів супутникової навігації. Просторово-часовий аналіз РЧС із використання БпЛА розглянуто в [10–11]. У [12] описано процес аналізу РЧС роєм БпЛА. У [13] запропоновано підхід до реконструкції розподілу електромагнітного поля в тривимірному просторі.

Щодо практичної реалізації результатів досліджень, то в доступних джерелах кількість інформації про готові рішення є досить обмеженою. У [14] запропоновано оснащувати БпЛА першого класу антенною системою, програмновизначеним радіоприймачем, процесором попереднього оброблення сигналів та радіоканалом для передавання інформації про радіоелектронну обстановку. У [15] вказано, що для ведення РМ у міських та приміських районах використовують БпЛА із обладнанням компаній Colibrex та LS Telcom, яке працює в діапазоні частот від 20 МГц до 50 ГГц. Фірми Ericsson та Nokia також розробляють засоби РМ для БпЛА, які потім можуть об'єднуватися в рої. Французька компанія ANFR виготовляє засоби РМ для БпЛА DJI у діапазонах частот 3 ГГц–30 ГГц та 30 ГГц–300 ГГц. Вимірюванню підлягають такі параметри: частота радіосигналу ДРВ, рівень сигналу, координати БпЛА і час виявлення сигналу. Подібні проекти розробляються також фірмами Ofcom (Великобританія) та FCC (США). Описані

рішення призначені здебільшого для об'єкту веж мобільного зв'язку з метою вимірювання рівнів потужності та оцінювання інших параметрів випромінювання. Компанія CRFS (Великобританія) пропонує інтегровані рішення радіочастотних сенсорів на БпЛА [16], одним із яких є малогабаритний засіб РМ, що досить легко може бути інтегрований практично в будь-який БпЛА. Цей засіб працює в діапазоні частот від 9 кГц до 18 ГГц. Компанія LS Telcom (Німеччина) [17] також пропонує повністю інтегровані рішення засобів РМ та БпЛА.

У результаті проведеного аналізу останніх наукових публікацій встановлено, що не вирішеним досі залишається питання математичного моделювання процесу РМ із використанням БпЛА, що буде враховувати параметри ДРВ, засобу РМ, траєкторії польоту БпЛА та середовища поширення радіохвиль (ПРХ), яке через переміщення БпЛА відносно ДРВ буде в загальному випадку нестационарним. Також у переважній більшості робіт вважається, що сигнал приймається, якщо є умови прямої видимості, і сигнал відсутній, якщо ці умови не забезпечуються, при цьому не враховуються явища перевідбиття та дифракції радіохвиль.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення математичних моделей процесу РМ із використанням БпЛА, що дозволить підвищити ефективність вирішення завдань РМ в умовах багатопроменевих завмирань за рахунок оптимізації методів та алгоритмів оброблення сигналів.

Виклад основного матеріалу

1. Визначення завдань радіомоніторингу

Основними завданнями моніторингу РЧС є [3]:

- 1) пошук, виявлення та спостереження за радіовипромінюваннями в заданому діапазоні частот;
- 2) інструментальне оцінювання параметрів радіовипромінювань;
- 3) селекція радіовипромінювань;
- 4) пеленгування ДРВ;
- 5) визначення місцеположення ДРВ;
- 6) ідентифікація радіовипромінювань та ДРВ.

Для виконання наведених завдань необхідно використовувати параметричний опис кожної зі складових процесу РМ (рис. 1), що впливають на нього.

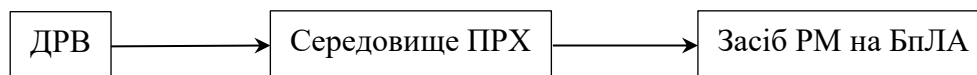


Рис. 1. Складові процесу РМ

У загальному випадку кількість ДРВ, сигнали яких можуть прийматися засобом РМ, може бути довільною. Для підвищення швидкості виявлення та точності визначення місцеположення ДРВ може використовуватися група (мережа) з кількох БпЛА.

Середовище ПРХ може бути описане як відкритий простір, сільська місцевість, передмістя, місто із середньою та щільною забудовою. Проте канал розповсюдження радіосигналу для кожної пари ДРВ та засобу РМ буде різним, що обумовлюється різним взаємним місцеположенням ДРВ та БпЛА відносно перешкод, параметрами ДРВ та динамікою руху БпЛА.

2. Визначення параметрів ДРВ

Окреме ДРВ будемо описувати за допомогою таких основних параметрів:

1) його просторові координати в прямокутній (x_e, y_e, z_e) або сферичній (r, θ, γ) системах координат, де r – відстань від ДРВ до БпЛА, θ – азимут, γ – кут місця. Ці значення можуть бути повністю невідомими або відомими неточно. У разі переміщення ДРВ із деякою швидкістю з'являється залежність значень координат від поточного часу t , тому в загальному випадку значення координат є залежними від часу;

2) припускаємо, що потужність випромінювання ДРВ P_e не змінюється в часі;

3) форма діаграми спрямованості (ДС) антенної системи $G_e(\theta, \gamma)$, її поляризація та орієнтація відносно БпЛА можуть змінюватися за рахунок переміщення апарата або ДРВ;

4) несуча частота радіосигналу f_0 ;

5) ширина спектра (смуги) сигналу ΔF_e ;

6) структура смугового комплексного сигналу $U(t)$, який у загальному вигляді можна навести в такому вигляді:

$$U(t) = A(t)e^{j\psi(t)}, \quad (1)$$

де $A(t)$ – залежність обвідної сигналу від часу;

$\psi(t)$ – залежність фази сигналу від часу;

7) розподіл щільності ймовірностей (РЩЙ) тривалостей випромінювання $p(T_e)$ ДРВ характеризує режим роботи ДРВ у часовій області (безперервний, пакетне передавання даних, імпульсний). Його доцільно розглядати як умовний для конкретного значення несучої частоти f_0 (частотного каналу) – $p(T_e|f_0)$. Це пов'язано з тим, що в різних діапазонах частот працюють РЕЗ за різними радіотехнологіями і в різних режимах. Наприклад, на частотах роботи FM-радіостанцій та веж цифрового телебачення завантаженість η становитиме 100% (оскільки вони працюють постійно). Для веж мобільного зв'язку, транкінгових систем завантаженість каналу визначатиметься лише активністю абонентів;

8) часова завантаженість η смуги випромінювання на частоті f_0 , що визначається як відношення сумарного часу тривалості випромінювання ДРВ до часу спостереження.

Сукупність усіх ДРВ у деякій області простору можна описати із використанням відповідних імовірнісних моделей, а саме:

1) розподілу щільності розміщення ДРВ на площині $p_e(x_e, y_e)$ або у просторі $p_e(x_e, y_e, z_e)$. Перша модель описує випадок, характерний для сільської місцевості та передмістя, коли висота польоту БпЛА z_s набагато більша за висоту розміщення ДРВ z_e , а всі ДРВ перебувають приблизно на одній висоті (рис. 2).

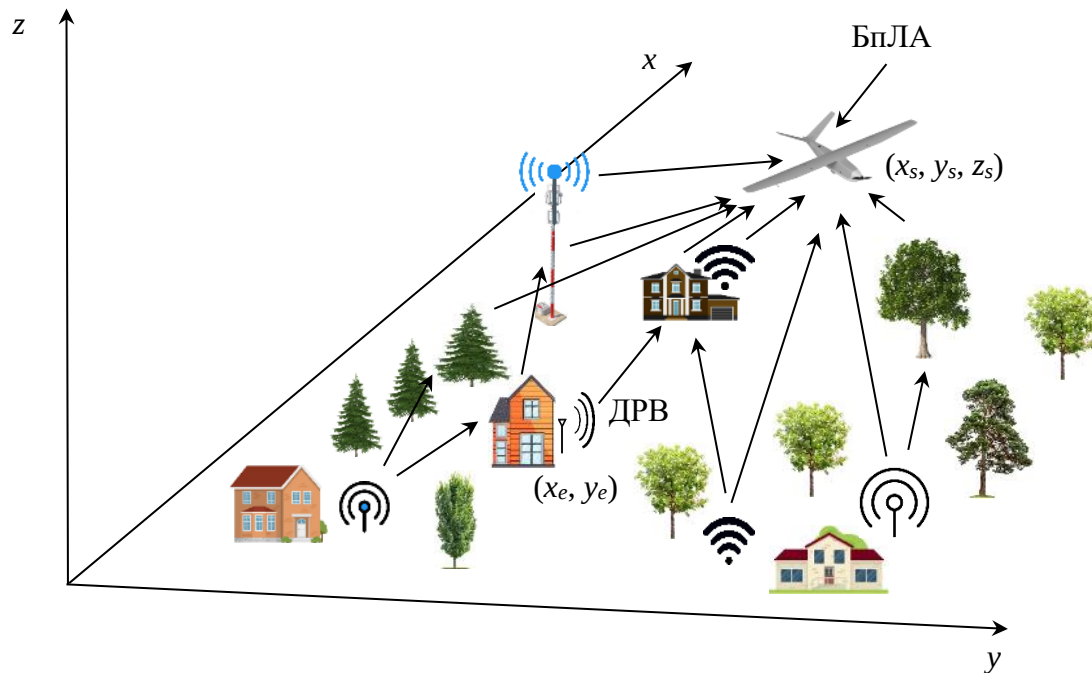


Рис. 2. Розміщення ДРВ на площині відносно БПЛА

Друга модель більше підходить для великих міст зі щільною забудовою із хмарочосів, коли ДРВ можуть бути на одному рівні або навіть вище за БПЛА (рис. 3).

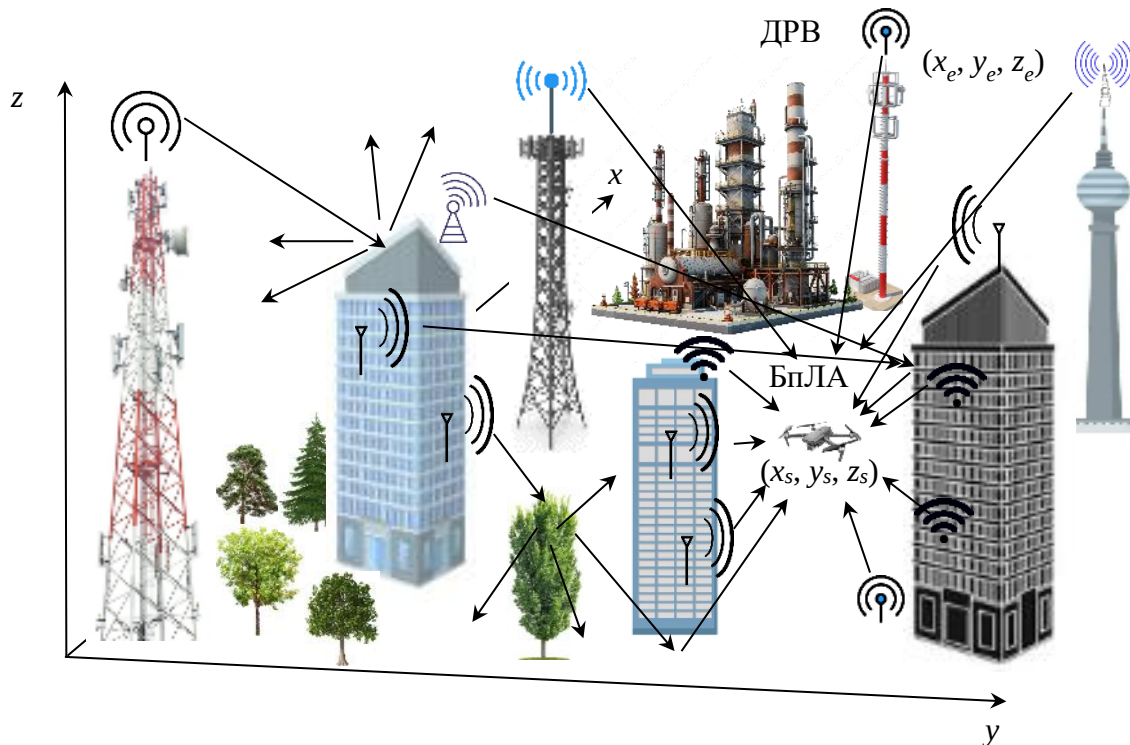


Рис. 3. Розміщення ДРВ у просторі відносно БПЛА

У [18] для опису умовної ймовірності розміщення об'єктів у різних точках простору запропоновано використовувати двовимірну функцію щільності розподілу об'єктів. Вона

створюється на основі апіорних даних про місцевість, попередніх спостережень або інтелектуальних оцінок, що відображають розподіл можливих об'єктів у певній області простору. Часто для цього використовують просторовий процес Пуассона [19–21].

Відомо кілька підходів до побудови цієї функції [22]: аналітичний (наприклад, двовимірним нормальним розподілом), емпіричний (ядерне оцінювання щільності із використанням віконного методу Парзена – Розенблатта [23], двовимірні гістограми), імітаційного моделювання (метод Монте-Карло) та кластеризації;

2) розподіл щільності ДРВ у частотній області $N_e(f_0)$, для відносно широкої смуги частот аналізу в загальному випадку він буде полімодальним, оскільки в неліцензованих діапазонах частот (наприклад, 433 МГц, 868 МГц) варто очікувати більшої кількості ДРВ, ніж у решті. Фізично залежність $N_e(f_0)$ вказує на те, як багато ДРВ потенційно можуть працювати в деякому діапазоні частот, наприклад, миттєвій смузі пропускання приймача;

3) РЩЙ значень ширини спектра (смуги) $p(\Delta F_e)$ радіосигналів ДРВ у смузі частот аналізу;

4) розподіл часової завантаженості в частотній області $\eta(f_0)$.

Дані функції розподілу щільності розміщення ДРВ та їх параметрів доцільно використовувати як апіорні дані для оптимізації маршрутів польоту БпЛА, сканування РЧС та алгоритмів оброблення сигналів. У разі відсутності будь-яких апіорних даних, що дозволятимуть побудувати необхідні щільності розподілів, доцільно користуватися припущенням про рівномірне розподілення щільності як ДРВ у просторі, так і значень параметрів їх випромінювань.

3. Визначення параметрів засобу РМ на БпЛА

Хоча засіб РМ і розміщено на БпЛА, проте через суттєву різницю фізичного змісту їх параметрів доцільно окремо описати засіб РМ та БпЛА.

Основними параметрами засобу РМ є:

- 1) миттєва ширина смуги пропускання приймача ΔF_s ;
- 2) мінімальна f_{min} та максимальна f_{max} частоти смуги сканування;
- 3) швидкість сканування за частотою f_s ;
- 4) чутливість приймача P_n ;
- 5) форма ДС антенної системи $G_s(\theta, \gamma)$, її поляризація та орієнтація відносно ДРВ.

Основними параметрами БпЛА, що впливають на процес РМ, є:

- 1) швидкість польоту v , можливі межі її зміни (v_{min} , v_{max});
- 2) тривалість польоту БпЛА T_F ;
- 3) координати БпЛА (x_s , y_s , z_s) та помилки визначення його місцеположення;
- 4) масогабаритні обмеження (максимальна вага корисного навантаження);
- 5) енергетичні обмеження (ємність та потужність джерела живлення).

Планування траєкторії польоту БпЛА повинно здійснюватися з урахуванням перешкод та апіорного розподілу щільності розміщення ДРВ у просторі. Під час ведення РМ траєкторія польоту може змінюватися для спостереження за виявленим ДРВ.

У разі використання групи БпЛА для ведення РМ заданої області простору суттєвим також є організація обміну інформацією за результатами аналізу РЧС для подальшої адаптації маршруту польоту з метою більш точної локалізації ДРВ.

4. Визначення параметрів середовища ПРХ

Під час поширення радіохвиля може зустріти на своєму шляху велику кількість перешкод. Залежно від геометричних розмірів та їх електромагнітних властивостей канал ПРХ в ультракороткохвильовому (УКХ) діапазоні довжин хвиль можна охарактеризувати ступенем прояву ефектів відбиття, дифракції, поглинання, розсіювання та інтерференції на конкретний радіосигнал у різних діапазонах частот та швидкістю їх зміни за взаємного переміщення ДРВ та засобу РМ.

Основними факторами, що впливають на рівень прийнятого сигналу, є втрати на поширення, великомасштабні та дрібномасштабні завмирання, неізотропність ДС антен ДРВ і БпЛА та неузгодженість їх поляризацій.

На відміну від втрат на поширення і затінення, які є впливом великомасштабних згукань від навколишніх об'єктів та відстані, найбільший вплив у мобільних радіосистемах мають дрібномасштабні завмирання. Серед багатьох фізичних ефектів у радіоканалі на формування дрібномасштабних завмирань найбільше впливають багатопроменеве поширення, швидкість руху ДРВ та БпЛА, швидкість навколишніх об'єктів, від яких відбиваються радіохвилі, ширина спектра сигналу та тривалість інформаційного символу.

Для опису каналу ПРХ часто використовують його імпульсну характеристику (ІХ), яку для нестаціонарного каналу поширення можна записати в такому вигляді [24]:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{N_p(t)} \alpha_i(t) \delta(t - \tau_i(t)) e^{j\varphi_i(t)}, \quad (2)$$

де $N_p(t)$ – кількість променів поширення сигналу в момент часу t ;

$\alpha_i(t)$ – амплітудний множник сигналу в i -му промені в момент часу t ;

$\tau_i(t)$ – затримка сигналу в i -му промені в момент часу t ;

$\varphi_i(t)$ – фаза сигналу в i -му промені в момент часу t , що змінюється за рахунок збільшення / зменшення відстані між ДРВ та БпЛА і зсуву фази в разі відбиття та розсіювання від перешкод, і є рівномірно розподіленою випадковою величиною на інтервалі від 0 до 2π ;

$\delta()$ – дельта-функція.

У таких каналах завмирання глибиною 30–40 дБ і більше відносно середнього рівня можуть зустрічатися кілька разів за секунду [25] й залежать від швидкості БпЛА (ДРВ) і несучої частоти сигналу та проявляються в разі їх переміщення лише на частину довжини хвилі.

Параметри ІХ каналу поширення є випадковими процесами, а їх залежність від часу пояснюється зміною взаємного положення ДРВ та засобу РМ, що призводить до трансформації умов ПРХ. Варто відмітити, що амплітудний множник α змінюється відносно повільно в обмеженій ділянці простору, тоді як фаза φ – суттєво за малих змін відстані.

Основними статистичними характеристиками, що описують мобільний радіоканал, є: РЦЙ миттєвих значень амплітуди прийнятого сигналу (логарифмічно нормальний,

Релея, Райса, Накагамі, Сузукі, Вейбулла) [26–28], автокореляційна функція випадкового процесу, що описує завмирання в каналі, середня тривалість завмирань (показує, як довго обвідна сигналу перебуває нижче деякого рівня), кількість перетинів деякого рівня за одиницю часу, смуга та час когерентності каналу.

Логарифмічно нормальне завмирання є результатом затінення від нерухомих місцевих перешкод і відображає дифракційні втрати. Відстань, на яких проявляється даний тип завмирання, є одного порядку з розмірами перешкод і проявляється, як правило, на інтервалах кількох десятків довжин хвиль. Шлях, на якому розраховують втрати за рахунок логарифмічно нормального затухання, складає зазвичай 20-40 довжин хвиль. Логарифмічно нормальний процес завмирання можна описати таким виразом:

$$f_L(t) = \exp\left(\sqrt{f_I^2(t) + f_Q^2(t)}\right), \quad (3)$$

де $s_I(t)$ та $s_Q(t)$ є випадковими процесами, які можна описати такими рівняннями:

$$\begin{aligned} f_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_L(t)}} \sum_{i=1}^{N_L(t)} I_i \cos\left(2\pi \frac{\nu}{r_{ci}} t + \varphi_i\right); \\ f_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_L(t)}} \sum_{i=1}^{N_L(t)} Q_i \sin\left(2\pi \frac{\nu}{r_{ci}} t + \varphi_i\right), \end{aligned} \quad (4)$$

де $N_L(t)$ – кількість гармонік для моделювання процесу затінення;

I_i , Q_i – випадкові значення амплітуд гармонік, що є стандартними, нормально розподіленими величинами;

r_{ci} – випадкове значення кореляційної відстані затінення [29], яке є випадковою величиною, рівномірно розподіленою в діапазоні $(10-60)\lambda$, де λ – довжина РХ;

φ_i – випадкове значення фази, що рівномірно розподілене в діапазоні $[0, 2\pi]$.

Завмирання Релея використовують для моделювання бездротових каналів в умовах відсутності прямої видимості, коли багато об'єктів у середовищі відбивають і розсіюють сигнал на його шляху до приймальної антени, що характерно для міських або лісових районів. Розподіл Релея застосовують для статистичного опису радіоканалу із рухомим приймачем. Цьому розподілу підпорядковуються значення обвідної прийнятого сигналу в каналі без частотно-селективних завмирань, тобто обвідна окремої частотної багатопроменевої складової. Відомо, що обвідна суми квадратів центральних гаусових випадкових процесів розподілена за законом Релея. Для моделювання завмирань Релея використовують метод Джейка [30], відповідно до якого низькочастотна комплексна обвідна прийнятого сигналу формується як результат суперпозиції деякої кількості гармонік N_p з випадковими параметрами (процес Релея):

$$f_R(t) = \sqrt{f_I^2(t) + f_Q^2(t)}, \quad (5)$$

де доданки є випадковими нормальними процесами, які записують відповідно до таких виразів:

$$\begin{aligned} f_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} I_i \cos(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i), \\ f_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} Q_i \sin(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i), \end{aligned} \quad (6)$$

де F_D – максимальне значення частоти Доплера;

ϑ_i – випадковий кут надходження радіохвилі, що рівномірно розподілений у діапазоні $[0, 2\pi]$.

Завмирання Райса враховує потужну компоненту прямого поширення та слабші розсіяні багатопроменеві компоненти. Його використовують для моделювання каналу всередині приміщення із відбивальними поверхнями. Завмирання Райса описують параметром, який визначають зі співвідношення потужності складової, що поширюється в межах прямої видимості, до дисперсії решти багатопроменевих складових [31]:

$$C_R = \frac{A^2}{2\sigma_R^2}, \quad (7)$$

де A – амплітуда сигналу;

σ_R – середьоквадратичне відхилення (СКВ) багатопроменевих складових.

За $A \rightarrow 0$ розподіл Райса вироджується в розподіл Релея.

Для моделювання завмирання Райса використовують (5), де значення складових у підкореновому виразі визначають у такий спосіб:

$$\begin{aligned} f_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} I_i \cos(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i) + \mu, \\ f_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{N_p(t)}} \sum_{i=1}^{N_p(t)} Q_i \sin(2\pi F_D (\cos \vartheta_i) t + \varphi_i) + \mu, \end{aligned} \quad (8)$$

де I_i , Q_i – випадкові значення амплітуд гармонік, що є нормально розподіленими величинами із середнім μ і СКВ σ_C , а саме:

$$\sigma_C = \sqrt{\frac{1}{2(C_R + 1)}} \quad \text{і} \quad \mu = \sqrt{\frac{C_R}{2(C_R + 1)}}. \quad (9)$$

Завмирання Сузукі є добутком процесу Релея та логарифмічно нормального процесу, воно не передбачає наявності прямої видимості через ефект затінення:

$$f_S(t) = f_R(t) f_L(t). \quad (10)$$

Цей тип завмирань є найбільш реалістичним для опису бездротових радіоканалів.

Завмирання Накагамі застосовують для моделювання середніх та сильних завмирань у каналах мобільного зв'язку та супутникових лініях, а завмирання Вейбула – для каналів зі змінними в часі умовами поширення.

Процеси Накагамі та Вейбула отримують із використанням процесу Релея шляхом введення додаткових параметрів, що дозволяє змінювати форму РЦЙ у досить широких межах.

Час когерентності каналу $\Delta T_{coh} \approx 0,423/F_D$ [26] відображає часовий інтервал, протягом якого канал залишається наближено стаціонарним. У загальному випадку канал вважають повільним, якщо тривалість інформаційного символу не перевищує час когерентності каналу, і швидким – у протилежному випадку.

Смуга когерентності каналу $\Delta F_{coh} \approx (5\sigma_\tau)^{-1}$ [26], де σ_τ – СКВ часу затримки в каналі, визначає його селективність за частотою. Канал вважається плоским, якщо ширина спектра сигналу менша за смугу когерентності, і частотно-селективним – у протилежному випадку. Частотні складові у спектрі сигналу, рознесені більше ніж на ΔF_{coh} , завмирають незалежно.

5. Модель прийнятого сигналу

Відсутність лінії прямої видимості призводить до того, що прийнятий сигнал є суперпозицією сигналів від одного ДРВ, що надходять із різних напрямків через наявність перешкод на шляху поширення, причому чим далі рознесені ДРВ і засіб РМ, тим швидше зростає кількість можливих непрямих шляхів поширення сигналу (рис. 2–3). Через багатопроменеве поширення прийнятий сигнал є сумою нескінченної кількості послаблених, затриманих у часі та зсунутих за фазою копій переданого сигналу, а переміщення ДРВ, приймача або перешкод призводять до появи ефекту Доплера та зміщення частоти прийнятого сигналу в кожному промені. Через цей ефект спостерігається також розширення спектра сигналу [33–34]. Зміщення частоти в i -му промені в момент часу t за рахунок ефекту Доплера в загальному випадку визначаємо з такого рівняння:

$$f_{Di}(t) = f_0 \frac{v(t)}{c} \cos \vartheta_i(t), \quad (11)$$

де $v(t)$ – швидкість руху БпЛА в момент часу t ;

c – швидкість ПРХ;

$\vartheta_i(t)$ – кут між вектором швидкості БпЛА та напрямком ПРХ.

Під час переміщення БпЛА відносно ДРВ тип каналу буде змінюватися, оскільки трансформуватиметься саме фізичне середовище (положення перешкод, відбивачів і розсіювачів у каналі). Крім того, один і той самий фізичний канал матиме різні статистичні характеристики залежно від параметрів ДРВ та швидкості БпЛА. В умовах

апріорної невизначеності щодо параметрів сигналу ДРВ та його місцеположення відносно перешкод і БпЛА тип каналу також буде невідомим. Наявні моделі каналів ПРХ розроблені для конкретних типів радіотехнологій [35]. Зокрема, COST 207 – для опису поширення вузькосмугових сигналів за технологією GSM, а COST 259 – для широкосмугових сигналів CDMA. Проте залежно від ширини спектра сигналу можна зробити деякі узагальнені припущення щодо моделі прийнятого сигналу з довільним видом модуляції.

У кожен момент часу на антену засобу РМ може надходити велика кількість сигналів від різних ДРВ. Сигнал k -го ДРВ будемо записувати в такому вигляді:

$$s_k(t) = U_k(t) e^{j2\pi f_{0k}t}, \quad (12)$$

де $U_k(t)$ – k -й смуговий сигнал;

f_{0k} – несуча частота k -го сигналу.

Тоді, відповідно, для опису каналу ПРХ вузькосмугових сигналів можна використовувати випадкові процеси завмирання (наприклад, Релея, Райса). У такому разі випадкові флуктуації k -го сигналу на вході антени можуть моделюватися як добуток переданого сигналу та стохастичного процесу $f_F(t)$, що описує завмирання в каналі [32]:

$$x_k(t) = s_k(t) f_{Fk}(t). \quad (13)$$

Для опису поширення широкосмугових сигналів доцільніше використовувати ІХ каналу (2). Узагальнену модель k -го сигналу із використанням ІХ k -го каналу можна записати в такий спосіб:

$$x_k(t) = s_k(t) * h_k(t). \quad (14)$$

Прийнятий від усіх ДРВ сигнал засобом РМ одного БпЛА можна записати у такий формі [36]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N_e(t)} x_k(t) + \xi(t), \quad (15)$$

де $N_e(t)$ – кількість ДРВ, що спостерігаються в момент часу t ;

$\xi(t)$ – внутрішній шум приймача РМ.

У разі використання групи БпЛА для ведення РМ прийнятий m -м засобом РМ вузькосмуговий сигнал запишемо в такому вигляді:

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^{N_{em}(t)} s_k(t) f_{Fkm}(t) + \xi(t), \quad (16)$$

де $N_{em}(t)$ – кількість ДРВ, що спостерігаються m -м БпЛА в момент часу t ;

$f_{km}(t)$ – випадковий процес ПРХ між k -м ДРВ та m -м БпЛА.

Відповідно, прийнятий широкосмуговий сигнал m -м засобом РМ можна описати таким виразом:

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^{N_{em}(t)} s_k(t) * h_{km}(t) + \xi(t), \quad (17)$$

де $h_{km}(t)$ – ІХ каналу ПРХ між k -м ДРВ та m -м БпЛА.

Кількість ДРВ, які потенційно можуть бути виявлені БпЛА в деякій області простору, визначається розподілом щільності їх розміщення, параметрами ДРВ та засобу РМ, а також ПРХ, що безпосередньо впливає на доступність ДРВ.

У разі ведення панорамного РМ необхідно враховувати: чим нижча частота радіохвилі, тим краще вона відбивається від перешкод і їх огинає, тобто буде далі поширюватися навіть в умовах відсутності прямої видимості. Тому за однакових параметрів польоту БпЛА (швидкість і маршрут польоту) тип каналу ПРХ може суттєво змінюватися під час сканування усієї смуги частот. Крім того, тип каналу змінюватиметься для сигналів, які суттєво відрізняються такими параметрами, як: тривалість символу та ширина спектра.

Також в умовах завмирань необхідно враховувати такі фактори:

сигнали, які передаються на двох ортогональних поляризаціях, мають некорельовані статистичні властивості завмирань;

сигнал, що випромінюється спрямованою антеною, підлягає впливу менш сильних завмирань (випромінювання в бік від основного шляху поширення буде невеликим через малий рівень бічних пелюсток антени, а отже, меншим буде і рівень багатопроменевої складової);

сигнали, що передаються на частотах, які рознесені більше ніж у 2–4 рази за смугу когерентності каналу, мають некорельовані завмирання;

рознесені в часі амплітудні відліки будуть некорельовані, якщо їх взаємна затримка буде більшою, ніж $1/(2F_D)$ [26].

6. Моделювання процесу пошуку ДРВ

Модель процесу РМ під час польоту БпЛА буде динамічною, оскільки час відіграє роль незалежної змінної, а поведінка системи змінюється в часі, і стохастичною, бо параметри складових процесу РМ є випадковими величинами та процесами [37–39]. Просторово-часове рівняння спостереження, що пов'язує сигнал із виходу антени з параметрами електромагнітного поля, записати в цьому випадку практично неможливо через наявність в середовищі поширення граничних областей та фізичних перешкод, де з'являються неоднорідні плоскі хвилі [40]. Тому будемо окремо розглядати пошук сигналів у частотно-часовій області та в просторі.

6.1. Пошук ДРВ за часом та за частотою

На сьогодні максимальні значення миттєвої смуги пропускання радіоприймальних пристроїв не перевищують кількох сотень мегагерц. У разі звуження миттєвої смуги пропускання приймача до одиниць-десятків мегагерц підвищується його чутливість, що

збільшує ймовірність виявлення сигналів за нижчих значень відношення сигнал-шум (ВСШ). Тому для аналізу РЧС в УКХ-діапазоні шириною кілька гігагерц необхідно проводити перебудову смуги приймача для пошуку ДРВ.

Алгоритм сканування заданої смуги РЧС полягає у визначенні послідовності та тривалості аналізу різних її ділянок у межах миттєвої смуги пропускання приймача. В умовах апіорної невизначеності щодо розподілу кількості ДРВ за несучими частотами та завантаженості різних діапазонів частот алгоритм сканування полягатиме в послідовному скануванні заданої смуги частот та виділенні на їх аналіз однакових інтервалів часу.

Наявність та врахування апіорної інформації про розподіл щільності ДРВ у частотній області $N_e(f_0)$ та часову завантаженість $\eta(f_0)$ смуг випромінювання дозволить підвищити ефективність роботи алгоритмів пошуку ДРВ за частотою. Це досягається за рахунок перерозподілу часу аналізу між різними діапазонами частот. Як показник якості алгоритмів пошуку ДРВ за частотою доцільно обрати кількість виявлених ДРВ N_D . Тоді критерієм оптимізації алгоритмів буде максимізація цього показника.

На рис. 4 показано залежність часу аналізу T_a у частотному каналі від частоти для випадків рівномірного сканування, коли на кожен частотний канал (у цьому контексті під частотним каналом розуміємо миттєву смугу пропускання приймача ΔF_s) виділяється однаковий інтервал часу, а після перерозподілу – з урахуванням апіорних даних.

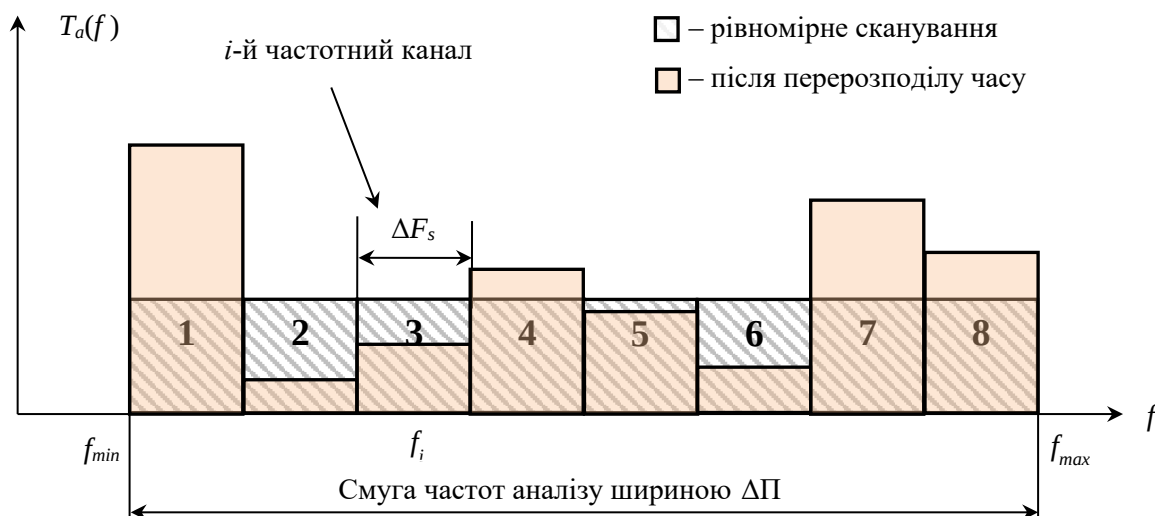


Рис. 4. Перерозподіл часу аналізу між частотними каналами

Нехай в умовах апіорної невизначеності для аналізу частотного каналу виділяється деякий час T_0 , що забезпечує виявлення сигналу ДРВ з імовірністю P_D для деякого значення ВСШ. Для сканування усієї смуги частот шириною $\Delta\Pi$ затрачається час $T_0\Delta\Pi/\Delta F_s$. У разі перерозподілу часу аналізу за частотними каналами сумарний час повинен залишатися незмінним. Очевидно, що для максимізації кількості виявлених ДРВ N_D необхідно виділяти більший час для аналізу тих частотних каналів, де їхня щільність вища, а завантаженість нижча. Якщо кожному частотному діапазону надати ще деяку функцію важливості $u(f)$ і виділяти більший час аналізу для тих частот, де її значення більше, то залежність часу аналізу від частоти можна отримати із використанням функції

$$g(f) = g(N_e(f), \bar{\eta}(f), u(f)), \quad (18)$$

де $\bar{\eta}(f)$ – середнє (за сукупністю ДРВ) значення завантаженості в i -му частотному каналі.

Тоді з урахуванням апіорних даних про розподіл ДРВ за частотами можна розрахувати залежність часу аналізу від частоти відповідно до такого виразу:

$$T_a(f) = \frac{T_0 \Delta \Pi}{\Delta F_s} \frac{\int_{f_i - 0,5\Delta F_s}^{f_i + 0,5\Delta F_s} g(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} g(f) df}, \quad (19)$$

де f_i – центральна частота i -го частотного каналу.

Пошук оптимального значення початкового часу аналізу T_0 потребує проведення додаткових досліджень, оскільки ним визначатимуться як показники якості виявлення сигналів в умовах багатопроменового ПРХ, так і помилки оцінювання частотно-часових і просторових параметрів ДРВ.

У разі використання групи БпЛА можливий розподіл усієї смуги сканування на окремі діапазони частот і виділення кожного діапазону окремому БпЛА.

6.2. Пошук ДРВ у просторі

Вихідні припущення для моделювання:

1) місцеположення ДРВ, які підлягають оцінюванню, у деякій області простору задане розподілом щільності їх розміщення $p_e(\mathbf{r}_e)$, де $\mathbf{r}_e = (x_e, y_e, z_e)$ – це вектор координат ДРВ;

2) вектор координати БпЛА $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s)$ у кожен момент часу вважаємо відомим (із деякою похибкою), у загальному випадку він змінюється в часі за рахунок переміщення апарата;

3) координати фізичних перешкод є невідомими, оскільки невідомими є координати ДРВ, тому неможливо визначити, які саме із просторових об'єктів розміщені на шляху ПРХ від ДРВ до БпЛА.

Відомими є лише координати будівель та інших великих об'єктів, які потенційно можуть бути перешкодами для ПРХ та заважають польоту БпЛА. Для УКХ-діапазону частот, зокрема вище 900 МГц, практично будь-який об'єкт (дерево, стовп, рекламний щит, лінія електропередач тощо) може бути перешкодою на шляху ПРХ, розсіювачем або відбивачем. Якщо координати будівель та їх вплив на ПРХ ще якось можна врахувати, то вплив таких об'єктів практично не підлягає врахуванню.

Задачею пошуку ДРВ у просторі є побудова такого оптимального маршруту польоту БпЛА, що дозволить із найменшими енергетичними затратами виявити максимальну кількість ДРВ. Маршрут польоту будемо шукати у вигляді масиву координат БпЛА в послідовні моменти часу:

$$\mathbf{R}_s = (\mathbf{r}_{s0}, \mathbf{r}_{s1}, \dots, \mathbf{r}_{sK}), \quad (20)$$

де K – кількість точок для побудови маршруту, а

$$\mathbf{r}_{si} = (x_s(t_i), y_s(t_i), z_s(t_i)) \quad (21)$$

є положенням БпЛА в момент часу t_i .

Обмеження для побудови маршруту:

його розраховують у деякій обмеженій області простору $\mathbf{A}_s$, що визначається дальністю польоту БпЛА;

він повинен мати мінімальну довжину, оскільки час польоту БпЛА обмежений;

максимальна кількість ДРВ буде виявлена тоді, коли ВСШ для більшості з них на маршруті польоту БпЛА буде якомога вищим, тому він повинен рухатися якомога ближче до максимумів розподілу щільності розміщення ДРВ $p(\mathbf{r}_e)$.

У разі полімодального розподілу $p(\mathbf{r}_e)$ (на рис. 5 наведено розподіл для 3 мод) область пошуку $\mathbf{A}_s$ необхідно розбити на окремі райони (**A**, **B** та **C**) таким чином, щоб у кожному з них був один екстремум. На рис. 5 для простоти візуалізації наведено порядок планування маршруту польоту одного БпЛА для випадку розміщення ДРВ на площині. У подальшому будемо розглядати більш загальний випадок для простору.

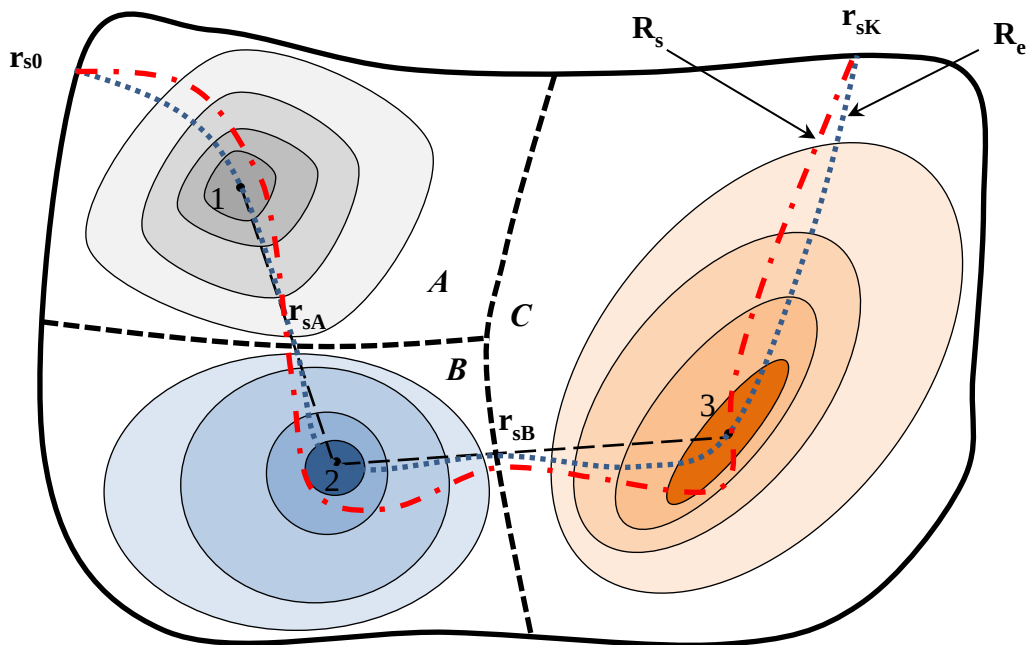


Рис. 5. Планування маршруту польоту одного БпЛА в разі розміщення ДРВ на площині

Перед розрахунком маршруту $\mathbf{R}_s$ задамо точки входу $\mathbf{r}_{s0}$ та виходу $\mathbf{r}_{sK}$ БпЛА з області $\mathbf{A}_s$. Тоді оцінку траєкторії польоту БпЛА будемо розраховувати за таким виразом:

$$\mathbf{R}_s = \arg \min_{\mathbf{R}_s \in \mathbf{A}_s} (\|\mathbf{R}_e - \mathbf{R}_s\|_2 + a \|\Delta \mathbf{r}_s\|_1), \quad (22)$$

де

$$\mathbf{R}_e = (\mathbf{r}_{e0}, \mathbf{r}_{e1}, \dots, \mathbf{r}_{eK}), \quad (23)$$

є масивом значень координат, що відповідають траєкторії польоту БПЛА вздовж максимуму щільності розміщення ДРВ;

$\Delta \mathbf{r}_s$ – масив довжин елементарних переміщень БПЛА;

a – параметр, що визначає штраф за нормою l_1 , і накладає обмеження на довжину шляху, яка повинна бути мінімальною;

$\|\cdot\|_1$ – норма l_1 (манхеттенська відстань);

$\|\cdot\|_2$ – норма l_2 (евклідова відстань).

Відмінність між масивами $\mathbf{R}_s$ та $\mathbf{R}_e$ полягає в тому, що для розрахунку $\mathbf{R}_s$ враховується низка додаткових обмежень, наприклад необхідність обльоту перешкод [41].

Елементи масиву $\mathbf{R}_e$ розраховують із використанням градієнта в такий спосіб:

$$\nabla p_e(\mathbf{r}_{ei}) = \frac{\partial p_e(\mathbf{r}_{ei})}{\partial x_{ei}} \vec{i} + \frac{\partial p_e(\mathbf{r}_{ei})}{\partial y_{ei}} \vec{j} + \frac{\partial p_e(\mathbf{r}_{ei})}{\partial z_{ei}} \vec{k}, \quad (24)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орти системи координат.

Тоді поточне значення вектора $\mathbf{r}_{ei}$ розраховують із використанням методу Ньютона – Рафсона відповідно до такого виразу [42]:

$$\mathbf{r}_{ei}(\Delta r) = \mathbf{r}_{ei-1} - \Delta r \nabla p_e(\mathbf{r}_{ei-1}), \quad (25)$$

де Δr – крок градієнта, оптимальне значення якого визначається шляхом побудови функції

$$F(\Delta r) = p_e(\mathbf{r}_{ei}(\Delta r)), \quad (26)$$

яку необхідно мінімізувати як функцію від Δr . Для цього розраховують і прирівнюють до нуля похідну, а саме:

$$\frac{\partial F(\Delta r)}{\partial \Delta r} = -\nabla p_e(\mathbf{r}_{ei}) \nabla p_e(\mathbf{r}_{ei-1}) = 0. \quad (27)$$

Як видно з виразу (25), для визначення масиву $\mathbf{R}_e$ використовується градієнтний спуск, що дозволяє розраховувати вектори від деякої точки до максимуму щільності $p_e(\mathbf{r}_e)$ (на рис. 5 максимуми позначено точками 1, 2 та 3 всередині районів **A**, **B** та **C**). Перші точки (вектори масиву $\mathbf{R}_e$) обчислюють від точки $\mathbf{r}_{s0}$ до точки 1. Точку $\mathbf{r}_{sA}$ на межі районів **A** та **B** розраховують як перетин прямої, що з'єднує точки 1 та 2 з лінією розділу районів.

Із цієї точки визначають множину точок до точок 1 та 2. Аналогічно знаходять множини точок від точки $\mathbf{r}_{\text{св}}$ до точок 2 та 3. Від точки $\mathbf{r}_{\text{ск}}$ розраховують маршрут до точки 3. Запропонований підхід масштабується на довільну кількість мод розподілу $p_e(\mathbf{r}_e)$.

Під час планування РМ із використанням кількох БПЛА доцільно враховувати відомі методи математичного моделювання застосування груп БПЛА, які розглянуто в [43–45]. Для визначення місцеположення ДРВ у такому разі необхідно організувати обмін інформацією між окремими БПЛА безпосередньо або через наземну станцію керування та контролю для адаптації маршруту польоту до поточної радіоелектронної обстановки.

Висновки. Наукова новизна результатів проведеного досліджень полягає у формулюванні узагальнених моделей прийнятого радіосигналу в умовах багатопроменевого поширення в разі ведення РМ із використанням БПЛА, а також моделей пошуку ДРВ у частотно-часовій області та в просторі. Надано рекомендації щодо оптимізації процесів РМ із погляду максимізації виявлених ДРВ. Отримані результати можуть бути впроваджені в наявні та перспективні комплекси й системи РМ на базі БПЛА, оскільки це дозволить підвищити ефективність пошуку ДРВ в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль. Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробленні параметричних моделей розподілів щільності розміщення ДРВ у просторі.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Лаптев О. А. Методологічні основи автоматизованого пошуку цифрових засобів негласного отримання інформації : монографія. Київ : ДУТ, 2020. 332 с.
2. Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. Вінниця : ВНТУ, 2020. 126 с.
3. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., Ступак В. С. Довідник з радіомоніторингу / Під заг. ред. П. В. Слободянюка. Ніжин : ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф", 2008. 588 с.
4. Про затвердження Порядку здійснення радіочастотного моніторингу у смугах радіочастот загального користування : постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку від 19.04.2023 № 139. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0758-23#Text> (дата звернення: 14.07.2025).
5. Papoci P., Radisic T., Mustra M. Integration of Software Defined Radio on an Unmanned Aerial Vehicle // Transportation Research Procedia. 2022. Vol. 64. P. 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.035>
6. UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks / N. Gul, S. Kim, J. Ali, J. Kim // PLoS One. 2023. Vol. 5. P. 36. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
7. Abohashish S. M. M., Rizk R. Y., Elsedimy E. I. Trajectory Optimization for UAV-Assisted Relay over 5G Networks Based on Reinforcement Learning Framework // J. Wireless Com Network. 2023. Vol. 55. <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02268-x>

8. Yan L., Cai Y., Wei H. Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC. EURASIP // J. Adv. Signal Process. 2024. Vol. 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>
9. Demonstration of UAV based GPS Jammer Localization During a Live Interference Exercise / A. Perkins et al. // Proc. the 29th International Technical Meeting of the Satellite. 2016. P. 3094–3106.
10. 3D Spectrum Sharing for Hybrid D2D and UAV Networks / B. Shang et al. // IEEE Transactions on Communications. 2020. Vol. 68, № 9. P. 5375–5389. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2997957>
11. UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks / F. Shen, G. Ding, Z. Wang, Q. Wu // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68, № 6. P. 5711–5722. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909167>
12. Distributed UAV Swarm Augmented Wideband Spectrum Sensing Using Nyquist Folding Receiver / K. Jiang et al. // Electrical Engineering and Systems Science. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07077>
13. 3D Compressed Spectrum Mapping with Sampling Locations Optimization in Spectrum-Heterogeneous Environment / F. Shen et al. // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. Vol. 21, № 1. P. 326–338. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3095342>
14. Integrating Cognitive Radio with Unmanned Aerial Vehicles: An Overview / D. Santana et al. // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 830. <https://doi.org/10.3390/s21030830>
15. Overview of the Use of Drones for Spectrum Monitoring Applications. Document WINNF-TR-2009. Version 1.0.0. 2021. 38 p.
16. Integrated Drone Solutions. High-performance TRL-9 RF Sensors for MoD, Government Agencies, and Commercial Customers Requiring EW & ISR Sensor Payload Solutions for UAVs. URL: <https://www.crfs.com/deployment/integrated-drones> (last accessed: 04.06.2025).
17. Spectrum Monitoring, Direction Finding and Microwave Link Measurements from the Air // LS OBSERVER Airborne Monitoring Unit (AMU) URL: <https://www.lstelcom.com/en/products/airborne-measurements/amu/> (last accessed: 04.06.2025).
18. 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 (І). С. 69–81. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.06>
19. Diggle P. J. Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns. 3rd ed. Taylor & Francis Group, LLC, 2014. 297 p.
20. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns / J. Illian et al. John Wiley & Sons Ltd, 2008. 557 p.
21. Streit R. L. Poisson Point Processes. Imaging, Tracking, and Sensing. Springer Science+Business Media, LLC, 2010. 280 p.
22. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. 758 p.
23. Kernel Density Estimation via the Parzen-Rosenblatt Window Method – Explained Using Python. URL: https://sebastianraschka.com/Articles/2014_kernel_density_est.html (last accessed: 04.06.2025).

24. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles And Practice. 2/E. Pearson Education, 2010. 709 p.
25. Microwave Mobile Communications. Ed. by William C. Jakes. A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 1974. 645 p.
26. Lathi B. P., Ding Z. Modern Digital and Analog Communication Systems. 5th ed. Oxford University Press, 2019. 1025 p.
27. Huang P., Rajan D., Camp J. Weibull and Suzuki Fading Channel Generator Design to Reduce Hardware Resources // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai, China, 2013. P. 3443–3448. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2013.6555117>
28. Stüber G. L. Principles of Mobile Communication. 4th ed. Springer, 2017. 732 p.
29. 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>
30. Patzold M., Laue F. Statistical Properties of Jakes' Fading Channel Simulator // VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No. 98CH36151). Ottawa, ON, Canada, 1998. Vol. 2. P. 712–718. <https://doi.org/10.1109/VETEC.1998.683675>
31. Recommendation ITU-R P.1406-2. Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands P. Series Radiowave Propagation. (07/2015). 13 p.
32. Kim H. Wireless Communications Systems Design. John Wiley & Sons, Ltd., 2015. 437 p.
33. Pätzold M. Mobile Fading Channels. John Wiley & Sons, Ltd., 2002. 430 p.
34. Simon M. K., Alouini M.-S. Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. John Wiley & Sons, Inc., 2000. 551 p.
35. The COST 259 Directional Channel Model. Part II: Macrocells / H. Asplund et al. / IEEE Transactions on Wireless Communications. Vol. 5, № 12. 2006. P. 3434–3450. <https://doi.org/10.1109/TWC.2006.01118>
36. Бугайов М. В. Математична модель прийнятого сигналу панорамним засобом радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті // Всеукр. міжвідомчий наук.-техн. зб. “Радіотехніка”. Харків : ХНУРЕ, 2024. № 219. С. 82–91. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09>
37. Heinz S. Mathematical Modeling. Springer, 2011. 474 p.
38. Davison A. C. Statistical Models. Cambridge University Press, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 2003, 738 p.
39. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer Science & Business Media, 2013, 442 p.
40. Van Trees H. L. Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. J.Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. 1470 p. <https://doi.org/10.1002/0471221104>
41. Advances in UAV Path Planning: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions / W. Meng et al. // Drones. 2025. Vol. 9. P. 376. <https://doi.org/10.3390/drones9050376>

42. Brunton S. L., Kutz J. N. Data-Driven Science and Engineering. Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. Cambridge University Press, 2019. <https://doi.org/10.1017/9781108380690>
43. Василенко О. Методи математичного моделювання застосування рою ударних безпілотних літальних апаратів // Повітряна міць України. 2025. № 1 (8). С. 54–70. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70>
44. Yang Y., Xiong X., Yan Y. UAV Formation Trajectory Planning Algorithms: A Review // Drones. 2023. Vol. 7 (1). P. 62. <https://doi.org/10.3390/drones7010062>
45. Adaptive Multi-UAV Trajectory Planning Leveraging Digital Twin Technology for Urban IIoT Applications / L. Zhao et al. // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. Nov.-Dec. 2024. Vol. 11, № 6. P. 5349–5363. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3344428>

Стаття надійшла до редакції 14.08.2025.

REFERENCES

1. Laptiev, O. A. (2020). *Metodolohichni osnovy avtomatyzovanoho poshuku tsyfrovyykh zasobiv nehlasnoho otrymannia informatsii: monohrafiia* [Methodological Foundations of Automated Search for Digital Means of Covert Information Acquisition: Monograph]. Kyiv [in Ukrainian].
2. Bortnyk, H. H., Vasylykivskiy, M. V., & Kychak, V. M. (2020). *Metody ta zasoby tsyfrovoho obroblyennia radiosyhnaliv dlia system bezpeky ta monitorynhu: monohrafiia* [Methods and Means of Digital Processing of Radio Signals for Security and Monitoring Systems: Monograph]. Vinnytsia [in Ukrainian].
3. Slobodianiuk, P. V., Blahodarnyi, V. H., & Stupak, V. S. (2008). *Dovidnyk z radiomonitorynhu* [Handbook of Radio Monitoring]. Nizhyn [in Ukrainian].
4. *Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia radiochastotnoho monitorynhu u smuhakh radiochastot zahalnoho korystuvannia : postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh elektronnykh komunikatsii, radiochastotnoho spektra ta nadання posluh poshtovoho zv'iazku vid 19.04.2023 № 139* [On Approval of the Procedure for Conducting Radio Frequency Monitoring in Public Radio Frequency Bands: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Spheres of Electronic Communications, Radio Frequency Spectrum and Provision of Postal Services from 19.04.2023 № 139]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0758-23#Text> [in Ukrainian].
5. Papoci, P., Radisic, T., & Mustra, M. (2022). Integration of Software Defined Radio on an Unmanned Aerial Vehicle. *Transportation Research Procedia*, 64, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.035>
6. Gul, N., Kim, S., Ali, J., & Kim, J. (2023). UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *PLoS One*, 5, 36. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
7. Abohashish, S. M. M., Rizk, R. Y., & Elsedimy, E. I. (2023). Trajectory Optimization for UAV-Assisted Relay over 5G Networks Based on Reinforcement Learning Framework. *J. Wireless Com Network*, 55. <https://doi.org/10.1186/s13638-023-02268-x>
8. 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>

9. Perkins, A. et al. (2016). Demonstration of UAV based GPS Jammer Localization During a Live Interference Exercise. In *Proc. the 29th International Technical Meeting of the Satellite*. (pp. 3094–3106).
10. Shang, B. et al. (2020). 3D Spectrum Sharing for Hybrid D2D and UAV Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 68, 9, 5375–5389. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2997957>
11. Shen, F., Ding, G., Wang, Z., & Wu, Q. (2019). UAV-Based 3D Spectrum Sensing in Spectrum-Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68, 6, 5711–5722. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2909167>
12. Jiang, K. et al. (2023). Distributed UAV Swarm Augmented Wideband Spectrum Sensing Using Nyquist Folding Receiver. *Electrical Engineering and Systems Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.07077>
13. Shen, F. et al. (2022). 3D Compressed Spectrum Mapping with Sampling Locations Optimization in Spectrum-Heterogeneous Environment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21, 1, 326–338. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3095342>
14. Santana, D. et al. (2021). Integrating Cognitive Radio with Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Sensors*, 21, 830. <https://doi.org/10.3390/s21030830>
15. *Overview of the Use of Drones for Spectrum Monitoring Applications*. Document WINNF-TR-2009. (2021). Version 1.0.0.
16. *Integrated Drone Solutions. High-performance TRL-9 RF Sensors for MoD, Government Agencies, and Commercial Customers Requiring EW & ISR Sensor Payload Solutions for UAVs*. (n.d.). Retrieved from <https://www.crfs.com/deployment/integrated-drones>
17. Spectrum Monitoring, Direction Finding and Microwave Link Measurements from the Air. *LS OBSERVER Airborne Monitoring Unit (AMU)*. (n.d.). Retrieved from <https://www.lstelcom.com/en/products/airborne-measurements/amu/>
18. Puleko, I. V., Chumakevych, V. O., & Shestak, I. M. et al. (2024). Funktsiia shchilnosti rozpodilu tsilei dlia planuvannia zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Target Density Function for UAV Planning]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 27 (I), 69–81. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.06> [in Ukrainian].
19. Diggle, P. J. (2014). *Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns*. (3rd ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
20. Illian, J. et al. (2008). *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. John Wiley & Sons Ltd.
21. Streit, R. L. (2010). *Poisson Point Processes. Imaging, Tracking, and Sensing*. Springer Science+Business Media, LLC.
22. Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
23. *Kernel Density Estimation via the Parzen-Rosenblatt Window Method – Explained Using Python*. (n.d.). Retrieved from https://sebastianraschka.com/Articles/2014_kernel_density_est.html
24. Rappaport, T. S. (2010). *Wireless Communications: Principles And Practice*. 2/E. Pearson Education.

25. *Microwave Mobile Communications*. (1974). Ed. by William C. Jakes. A John Wiley & Sons, Inc. Publication.
26. Lathi, B. P., & Ding, Z. (2019). *Modern Digital and Analog Communication Systems*. (5th ed.). Oxford University Press.
27. Huang, P., Rajan, D., & Camp, J. (2013). Weibull and Suzuki Fading Channel Generator Design to Reduce Hardware Resources. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Shanghai, China. (pp. 3443–3448). <https://doi.org/10.1109/WCNC.2013.6555117>
28. Stüber, G. L. (2017). *Principles of Mobile Communication*. (4th ed.). Springer.
29. 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>
30. Patzold, M., & Laue, F. (1998). Statistical Properties of Jakes' Fading Channel Simulator. In *VTC '98. 48th IEEE Vehicular Technology Conference. Pathway to Global Wireless Revolution (Cat. No. 98CH36151)*. Ottawa, ON, Canada. Vol. 2. (pp. 712–718). <https://doi.org/10.1109/VETEC.1998.683675>
31. Recommendation ITU-R P.1406-2. Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands. (07/2015). *P. Series Radiowave Propagation*.
32. Kim, H. (2015). *Wireless Communications Systems Design*. John Wiley & Sons, Ltd.
33. Pätzold, M. (2002). *Mobile Fading Channels*. John Wiley & Sons, Ltd.
34. Simon, M. K., & Alouini, M.-S. (2000). *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
35. Asplund, H. et al. (2006). The COST 259 Directional Channel Model. Part II: Macrocells In *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5, 12, 3434–3450. <https://doi.org/10.1109/TWC.2006.01118>
36. 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]. In *Vseukr. mizhvidomchyi nauk.-tekhn. zbirn. "Radiotekhnika" [All-Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection "Radio engineering"]*. Kharkiv. № 219. (pp. 82–91). <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09> [in Ukrainian].
37. Heinz, S. (2011). *Mathematical Modeling*. Springer.
38. Davison, A. C. (2003). *Statistical Models*. Cambridge University Press, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.
39. Wasserman L. (2013). *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*. Springer Science & Business Media.
40. Van Trees, H. L. (2002). *Optimum Array Processing*. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory. J.Wiley & Sons, Inc., New York. <https://doi.org/10.1002/0471221104>
41. Meng, W. et al. (2025). Advances in UAV Path Planning: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions. *Drones*, 9, 376. <https://doi.org/10.3390/drones9050376>

42. Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2019). *Data-Driven Science and Engineering. Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108380690>
43. Vasylenko, O. (2025). Metody matematychnoho modeliuвання zastosuvannya roiu udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ [Methods of Mathematical Modeling of the Use of Swarms of Strike Unmanned Aerial Vehicles]. *Povitriana mits Ukrainy [Air Power of Ukraine]*, 1 (8), 54–70. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70> [in Ukrainian].
44. Yang, Y., Xiong, X., & Yan, Y. (2023). UAV Formation Trajectory Planning Algorithms: A Review. *Drones*, 7 (1), 62. <https://doi.org/10.3390/drones7010062>
45. Zhao, L. et al. (2024). Adaptive Multi-UAV Trajectory Planning Leveraging Digital Twin Technology for Urban IIoT Applications. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 11, 6, 5349–5363. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3344428>

M. V. Buhaiov, V. V. Kliaznyka, M. I. Oboronov

UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED SPECTRUM SENSING PROCESS MATHEMATICAL MODELING

Due to rapid development of radio communication technology, implementation of new radio technologies and increasing in the speed of transmission of ever-increasing volumes of information, the need for a general purpose radio frequency spectrum is growing significantly every year. Therefore, spectrum sensing comprises a special role in the process of improving the radio frequency spectrum management system. In large cities with dense multi-story buildings, spectrum sensing, even with the use of portable devices, will be quite difficult, and in some cases practically impossible. The use of unmanned aerial vehicles increases the flexibility of spatial placement of radio monitoring devices and the speed of scanning a given area, improves the energy accessibility of radio emission sources by creating conditions for direct visibility. The purpose of the article is to develop mathematical models of spectrum sensing process using unmanned aerial vehicles, which will increase the efficiency of radio monitoring in conditions of multipath fading by optimizing signal processing methods and algorithms. When presenting the main material of the study, the tasks and components of spectrum sensing process are defined, the parameters of a single source of radio emission and their set in a certain area of space are described using appropriate probability models, as well as parameters of radio monitoring device and radio wave propagation environment. It is shown that flight path of an unmanned aerial vehicle should be planned taking into account obstacles and a priori distribution of the density of radio emission sources in space. Models of received signal are presented for their narrowband and broadband representations. When modeling the process of radio emission sources searching, it is advisable to consider separately the search for signals in frequency-time domain and in space.

Keywords: multipath fading; unmanned aerial vehicle; radio frequency source; mathematical modelling; spectrum sensing.

О. О. Костира, А. А. Гризо, О. М. Пилипович, І. О. Романенко

МЕТОД ПЕРЕДСПОТВОРЕННЯ ФАЗИ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ БІЧНИХ ПЕЛЮСТОК ФУНКЦІЇ АВТОКОРЕЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ ІЗ НЕЛІНІЙНОЮ ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Одним із визначальних етапів розвитку радіолокаційних систем стало запровадження складних сигналів із внутрішньоімпульсною модуляцією частоти або фази, що забезпечило збільшення тривалості зондувальних сигналів, тобто їх потужності, без втрати розрізнявальної здатності за дальністю завдяки стисненню луна-сигналів у пристроях узгодженого оброблення. Негативним наслідком від застосування таких сигналів є наявність бічних пелюсток автокореляційних функцій, рівень яких відносно максимуму для сигналів із лінійною частотною модуляцією становить 13 дБ. Тло бічних пелюсток «розтягує» зону дії пасивних перешкод за дальністю, що погіршує потенційні можливості радіолокаційних засобів із виявлення цілей. Зниження максимального рівня бічних пелюсток сигналу на виході узгодженого фільтра є актуальним завданням, яке можна вирішити шляхом використання сигналів із нелінійною частотною модуляцією.

Статтю присвячено розробленню методу зниження максимального рівня бічних пелюсток автокореляційних функцій багатофрагментних нелінійно-частотно-модульованих сигналів за рахунок введення додаткових стрибків миттєвої фази на стиках фрагментів. Відмінною особливістю запропонованого методу від відомих є те, що він застосовується для математичних моделей, які забезпечують розрахунок та компенсацію частотно-фазових спотворень у моменти переходів від одного фрагмента сигналу до іншого. Проведений аналіз відомих публікацій показує, що для таких математичних моделей метод фазового передспотворення раніше не застосовувався. Отже, завданням цього дослідження є визначення доцільності введення додаткових фазових стрибків на переходах між фрагментами сигналів із нелінійною частотною модуляцією. Розглядаються дво- та трифрагментні сигнали, до складу яких входять фрагменти як із лінійними, так і з нелінійними законами частотної модуляції. Дослідження підтвердили, що можна підібрати такі значення стрибків миттєвої фази, за яких максимальний рівень бічних пелюсток знижується. Для наведених параметрів сигналів максимальне зниження становить 2,33 дБ, найнижче значення максимального рівня бічних пелюсток -24,63 дБ отримано для трифрагментного сигналу з лінійною частотною модуляцією, а зниження цього рівня за рахунок введення додаткових стрибків миттєвої фази становить 1,11 дБ.

Ключові слова: сигнали з нелінійною частотною модуляцією; математична модель; стрибок миттєвої фази та частоти; автокореляційна функція; максимальний рівень бічних пелюсток.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Внутрішньоімпульсна частотна (фазова) модуляція зондувальних сигналів забезпечує можливість збільшення вихідної потужності радіопередавального пристрою в разі збереження розрізняювальної здатності за дальністю за рахунок стиснення луна-сигналів в узгодженому фільтрі радіоприймального пристрою. Радіолокаційні сигнали, які стискаються в пристрої узгодженого оброблення та мають базу, тобто добуток їх тривалості на ширину спектра, більшу за одиницю, прийнято називати складними. Одним із них, який широко застосовується в радіотехнічних системах, є сигнал із лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) [1–3], однак він має суттєвий недолік – відносно високий максимальний рівень бічних пелюсток (МРБП, РБП, БП) автокореляційної функції (АКФ), який становить близько -13 дБ. У реальних наземних оглядових радіолокаційних станціях наявність такого високого МРБП призводить до маскуванню відбиттів від малорозмірних цілей за рахунок «розтягування» зони пасивних перешкод за дальністю. Розширення цієї зони може досягати (20–30)% від максимальної дальності дії радіолокатора, тобто ймовірність правильного виявлення цілей із малими ефективними поверхнями розсіювання (ЕПР) на цьому відтинку знижується. Також у разі високого МРБП відбувається маскуванню відбиттів від цілей із малими ЕПР на тлі цілей із великими ЕПР [1–4].

Зменшення впливу цього ефекту досягається зниженням МРБП вихідних сигналів узгодженого фільтра за рахунок використання нелінійно-частотно-модульованих (НЛЧМ) сигналів. Синтез таких сигналів відбувається шляхом поєднання в часі кількох (двох, трьох) фрагментів із лінійними або нелінійними законами частотної модуляції (ЧМ) у різних комбінаціях [5–13].

Авторами показано, що на стиках фрагментів НЛЧМ сигналів виникають стрибки миттєвої частоти та фази, у разі використання математичних моделей (ММ) поточного часу, або тільки фази для ММ зсунутого часу, а також запропоновано механізм їх компенсації [5–13].

Компенсація спотворень частотно-фазової структури результуючого НЛЧМ сигналу сприяє нормалізації його амплітудно-частотного спектра (АЧС) та автокореляційної функції (АКФ) і, як наслідок, здебільшого забезпечує зниження МРБП.

Дослідження ММ НЛЧМ-сигналів показують, що можна досягти подальшого зниження їх МРБП шляхом введення передспотворення миттєвої фази (фазового стрибка) на стиках фрагментів.

Завданням цієї статті є дослідження доцільності введення додаткового стрибка миттєвої фази на стику фрагментів НЛЧМ-сигналів кількох видів для зниження їх МРБП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження НЛЧМ-сигналів за останні роки охоплюють широкий спектр задач від підвищення розрізняювальної здатності та зниження РБП до створення завадових сигналів і застосування в суміжних галузях. У переважній більшості робіт основна увага зосереджена на методах формування багатofрагментних та поліноміальних сигналів. Автори дослідження [14] розробили трифрагментний НЛЧМ-сигнал, що забезпечує нижчий РБП, який можна описати послідовністю кількох ЛЧМ-фрагментів із різною швидкістю ЧМ (ШЧМ – відношення

діапазону зміни частоти до тривалості фрагмента). Запропоновано правило для вибору ШЧМ, що дозволяє знизити РБП та зберегти високу роздільну здатність із дальності. Результати моделювання підтвердили ефективність підходу та його придатність для локації повітряних цілей. У роботі [15] показано, що використання НЛЧМ-сигналів із нерівномірним інтервалом повторення імпульсів значно знижує МРБП, роблячи такі сигнали ефективними для розв'язання радіолокаційних і гідроакустичних задач. У дослідженні [16] розглянуто застосування НЛЧМ ультразвукових сигналів у магніто-акусто-електричній томографії. Результати експериментів продемонстрували, що такий підхід дозволяє досягти вищого співвідношення сигнал/перешкода та підвищеної чутливості, зменшити РБП у разі стиснення імпульсу (що розширює динамічний діапазон виявлення), а також істотно підвищити стійкість до перешкод порівняно з використанням ультразвукових сигналів на основі ЛЧМ. У радіолокаційній сфері простежується тенденція до вдосконалення НЛЧМ-сигналів для підвищення селективності та зниження РБП після імпульсного стиснення. Зокрема, у [17] показано, що застосування НЛЧМ-сигналів у імпульсно-доплерівській радіолокаційній станції підвищує ефективність виявлення та класифікації безпілотних літальних апаратів на фоні птахів. Використання НЛЧМ дозволило зменшити РБП та забезпечити більш точне розрізнення об'єктів у складних цільових умовах.

Найпростішим варіантом багатофрагментного НЛЧМ-сигналу є випадок, коли такий сигнал має два фрагменти з однаковими або відмінними законами ЧМ, при цьому ШЧМ фрагментів мають відрізнятися таким чином, щоб забезпечити крайові зміни спектральної щільності потужності (СЩП) результуючого спектра, тобто сприяти його округленню.

Для трифрагментних НЛЧМ-сигналів запропоновано ММ на основі ЛЧМ-фрагментів [6, 11], перший та третій фрагменти якої можуть мати однакове або різне значення ШЧМ, яке є більшим за ШЧМ другого фрагмента. Таке компонування законів зміни ШЧМ гарантує двостороннє округлення результуючого АЧС, що еквівалентно ваговому обробленню сигналу в часовій області [2], та забезпечує зниження МРБП його АКФ порівняно з класичним ЛЧМ-сигналом.

Формулювання завдання дослідження. Метою роботи є розроблення методу зниження МРБП багатофрагментних НЛЧМ-сигналів за рахунок введення передспотворень їх фазової структури. Сутність дослідження полягає в порівняльному аналізі результатів роботи ММ НЛЧМ-сигналів за відсутності фазових спотворень на стиках фрагментів, а також за наявності навмисно введених стрибків миттєвої фази для того, щоб мінімізувати МРБП.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконаємо за такою схемою: спочатку отримаємо результати моделювання розроблених ММ без передспотворень миттєвої фази на стику фрагментів НЛЧМ-сигналів, а потім введемо передспотворення та порівняємо отримані дані.

Для порівняльного аналізу двофрагментних НЛЧМ-сигналів використаємо ММ із поєднанням:

двох ЛЧМ-фрагментів [5, 11];

фрагментів із корінь-квадратичною (Кк) та ЛЧМ [9];

фрагментів із лінійною та експоненціальною ЧМ (ЕкспЧМ) [10].

Двофрагментні НЛЧМ-сигнали типу ЛЧМ – ЛЧМ досліджено для випадків ММ поточного [5–10] та зсунутого [11–13] часу. У [18] показано, що за наявності компенсувальних складових ММ поточного та зсунутого часу є еквівалентними, тому обмежимося розглядом ММ поточного часу.

Запишемо ММ миттєвої фази сигналу типу ЛЧМ – ЛЧМ [5]:

$$\varphi(t) = 2\pi \begin{cases} f_0 t + \frac{\beta_1 t^2}{2}, 0 \leq t \leq T_1; \\ [f_0 + (\beta_2 - \beta_1) T_1] t + \frac{\beta_2 t^2}{2} - \delta\varphi_{12}, T_1 < t \leq T_1 + T_2, \end{cases} \quad (1)$$

де f_0 – початкова частота НЧМ-сигналу;

T_1, T_2 – тривалість першого та другого фрагментів сигналу;

β_1, β_2 – ШЧМ першого та другого ЛЧМ-фрагментів, які дорівнюють

$$\beta_1 = \frac{\Delta f_1}{T_1};$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta f_2}{T_2},$$

де $\Delta f_1, \Delta f_2$ – девіація частоти (різниця між верхньою та нижньою частотами) відповідного ЧМ-фрагмента;

$\delta\varphi_{12}$ – стрибок миттєвої фази на стику фрагментів сигналу:

$$\delta\varphi_{12} = \frac{(\beta_2 - \beta_1) T_1^2}{2}. \quad (2)$$

Також скористаємося ММ НЛЧМ-сигналу типу КкЧМ – ЛЧМ, яку запропоновано в [9], та отримаємо вираз для миттєвої фази цього сигналу:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 2\pi \left[f_0 t + \frac{2\beta_1 \sqrt{t^3 T_1}}{3} \right], 0 \leq t \leq T_1; \\ 2\pi \left[\left(f_0 - \left(\beta_2 - \frac{\beta_1}{2} \right) T_1 \right) t + \frac{\beta_2 t^2}{2} \right] - \delta\varphi_{12}, T_1 < t \leq T_1 + T_2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{де } \delta\varphi_{12} = 2\pi T_1^2 \left(\frac{\beta_2}{2} - \frac{\beta_1}{3} \right).$$

На завершення досліджень двофрагментних сигналів розглянемо ММ типу ЛЧМ – ЕкспЧМ, яку отримано в [10]:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 2\pi \left[f_0 t + \frac{\beta_1 t^2}{2} \right], 0 \leq t \leq T_1; \\ 2\pi \left[(f_0 - \delta f_{12})t + \Delta f_2 \exp\left(\frac{t^3}{6T_2^2}\right) \right] - \delta \varphi_{12}, T_1 < t \leq T_1 + T_2, \end{cases} \quad (4)$$

де δf_{12} – стрибок миттєвої частоти в момент переходу від першого до другого фрагмента сигналу:

$$\delta f_{12} = \Delta f_2 \frac{T_1^2}{2T_2^2} \exp\left(\frac{T_1^3}{6T_2^2}\right) - \beta_1 T_1;$$

$$\delta \varphi_{12} = 2\pi \left\{ \Delta f_2 \exp\left(\frac{T_1^3}{6T_2^2}\right) - \frac{1}{2} \beta_1 T_1^2 \right\}.$$

Отже, наведені результати охоплюють номенклатуру двофрагментних НЛЧМ-сигналів, які мають у своєму складі лише ЛЧМ-фрагменти, один із яких має нелінійний закон ЧМ, при чому фрагменти з нелінійною ЧМ знаходяться як перед, так і після ЛЧМ фрагмента.

Для моделювання трифрагментних НЛЧМ-сигналів скористаємося ММ, отриманою в [6]:

$$\varphi(t) = 2\pi \begin{cases} f_0 t + \frac{\beta_1 t^2}{2}, 0 \leq t \leq T_1; \\ [f_0 - (\beta_2 - \beta_1)T_1]t + \frac{\beta_2 t^2}{2} - \delta \varphi_{12}, T_1 < t \leq T_1 + T_2; \\ [f_0 - (\beta_3 - \beta_1)T_1 - (\beta_3 - \beta_2)T_2]t + \frac{\beta_3 t^2}{2} - \delta \varphi_{23}, T_1 + T_2 < t \leq T_1 + T_2 + T_3, \end{cases} \quad (5)$$

де $\delta \varphi_{12}$ розраховуємо відповідно до (2);

$\delta \varphi_{23}$ – стрибок миттєвої фази на стику 2-го та 3-го фрагментів, для якого запишемо

$$\delta \varphi_{23} = \frac{1}{2} [T_1^2 (\beta_3 + \beta_1) + T_2^2 (\beta_3 + \beta_2)].$$

Проведення подальших досліджень виконаємо із застосуванням ММ (1), (3)–(5). Для введення передспотворення миттєвої фази на стику фрагментів під час моделювання будемо варіювати значення $\delta \varphi_{12}$ та $\delta \varphi_{23}$ у сторону збільшення чи зменшення на деяку величину $\Delta \varphi_{12}$, $\Delta \varphi_{23}$.

Для математичного моделювання використано пакет прикладних програм MATLAB, з метою покращення наочності результатів дослідження надано графічний матеріал для випадку трифрагментного НЛЧМ-сигналу типу (5).

У табл. 1 наведено результати експериментальних досліджень двофрагментних НЛЧМ-сигналів для трьох наборів параметрів за умови відсутності додаткового стрибка миттєвої фази на стику фрагментів $\Delta\varphi_{12}$, а також за його наявності, у такому разі частотно-часові параметри сигналів зберігаються.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень двофрагментних НЛЧМ-сигналів

Вид сигналу	T_1 , мкс	T_2 , мкс	Δf_1 , кГц	Δf_2 , кГц	$\Delta\varphi_{12}$, рад.	МРБП, дБ	Шв. спад. РБП, дБ/дек
ЛЧМ – ЛЧМ	10	50	200	400	0	-18,58	20,0
					$-0,075\pi$	-18,96	19,0
	20	100	200	400	0	-17,31	19,0
					$-0,19\pi$	-17,86	18,0
	40	200	300	700	0	-18,07	20,0
					$-0,07\pi$	-18,13	19,0
КкЧМ – ЛЧМ	20	40	400	200	0	-20,59	20,0
					$-0,057\pi$	-21,67	22,0
	40	80	500	100	0	-20,37	23,0
					$-0,2\pi$	-22,70	22,0
	80	160	600	400	0	-20,16	23,0
					$-0,5\pi$	-21,31	21,0
ЛЧМ – ЕкспЧМ	40	20	400	200	0	-19,40	19,0
					$+0,032\pi$	-19,78	18,5
	80	40	350	250	0	-18,20	22,0
					$+0,28\pi$	-20,02	17,5
	160	80	700	300	0	-18,31	18,0
					$+0,6\pi$	-19,01	15,0

Аналіз даних табл. 1 свідчить про те, що введення передспотворення миттєвої фази на стику фрагментів може сприяти зниженню МРБП, величина такого передспотворення різна для різних наборів частотно-часових параметрів НЛЧМ-сигналів. Зі збільшенням бази сигналу (добутку сумарної тривалості та результуючої девіації частоти) чутливість до введення стрибка фази падає, а тому його значення необхідно збільшувати. Додатковий фазовий стрибок на стику фрагментів викликає перерозподіл енергії бічних пелюсток АКФ, за рахунок чого можна досягти збільшення чи зменшення їх рівня, а вирівнювання кількох ближніх БП формує п'єдестал навколо головної пелюстки, у результаті чого МРБП знижується. Платою за зниження МРБП є зменшення швидкості спадання РБП для майже всіх наборів параметрів, що є цілком прогнозованим.

Виявлено, що найбільш ефективним є введення фазового передспотворення для сигналів типу КкЧМ – ЛЧМ, при цьому найбільше зниження МРБП становить 2,33 дБ, найнижчу ефективність зафіксовано для ЛЧМ – ЛЧМ сигналів – менше 1 дБ.

У табл. 2 наведено експериментальні дані досліджень сигналів типу ЛЧМ – ЛЧМ – ЛЧМ. Для відображення отриманих результатів кількість стовпців збільшена та відповідає кількості значень у наборі частотно-часових параметрів. Також введено стовпець для значення додаткового стрибка фази на стику другого та третього ЛЧМ-фрагментів $\Delta\varphi_{23}$.

З аналізу результатів, наведених у табл. 2, можна зробити висновок, що виявлена закономірність щодо зміни чутливості до стрибка фази залежно від величини бази сигналу зберігається. Однак перерозподіл енергії пелюсток АКФ може призводити до того, що максимальний рівень мають більш віддалені БП, а тому швидкість спадання РБП збільшується, про що свідчать отримані дані. Середнє зниження МРБП за рахунок фазового передспотворення для наведених параметрів сигналів становить близько 1,0 дБ.

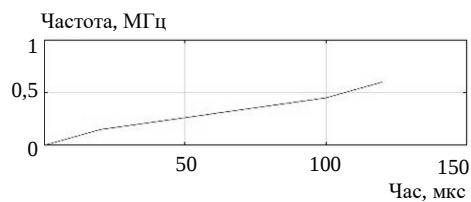
Таблиця 2

Експериментальні дані досліджень трифрагментних НЛЧМ-сигналів

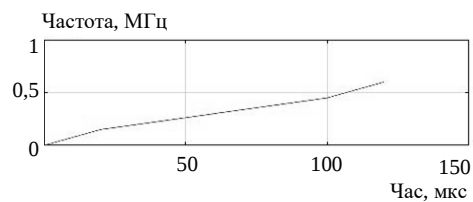
Вид сигналу	T_1 , мкс	T_2 , мкс	T_3 , мкс	Δf_1 , кГц	Δf_2 , кГц	Δf_2 , кГц	$\Delta\varphi_{12}$, рад.	$\Delta\varphi_{23}$, рад.	МРБП, дБ	Шв. спад. РБП, дБ/дек
ЛЧМ – ЛЧМ – ЛЧМ	10	40	10	150	300	150	0	0	-23,52	17,5
							+0,049 π	-0,049 π	-24,63	20,0
	20	80	20	150	300	150	0	0	-21,52	18,0
							-0,07 π	+0,025 π	-22,4	17,0
	40	160	40	250	500	250	0	0	-19,8	22,0
							-0,14 π	+0,1 π	-20,7	23,0

Особливість трифрагментного-НЛЧМ сигналу полягає в тому, що введення стрибка фази на стику першого та другого фрагментів $\Delta\varphi_{12}$ автоматично викликає зміну миттєвої фази на другому стику $\Delta\varphi_{23}$. Тому для першого набору параметрів табл. 2 спостерігається наявність фазових стрибків протилежного знака на стиках фрагментів. Визначальним виявилось значення $\Delta\varphi_{12}$, а перехід від другого до третього фрагмента фактично залишився без введення додаткового стрибка фази. Для двох наступних наборів параметрів величину фазового стрибка між другим та третім фрагментами по відношенню до попереднього зменшено.

Найбільш показовими з отриманих є результати дослідження трифрагментних НЛЧМ сигналів, графічний матеріал для другого набору параметрів табл. 2 наведено на рис. 1–4, у лівій частині показано результати моделювання за відсутності додаткового фазового стрибка, а в правій частині – за його наявності. Графіки зміни миттєвої частоти продемонстровано на рис. 1а, 1б, осцилограми сигналів у районах першого стику фрагментів – на рис. 2а, 2б, другого – на рис. 2в, 2г. На рис. 3а, 3б показано відповідні АЧС, а на рис. 4а, 4б – АКФ сигналів.

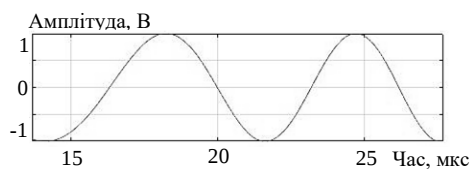


а)

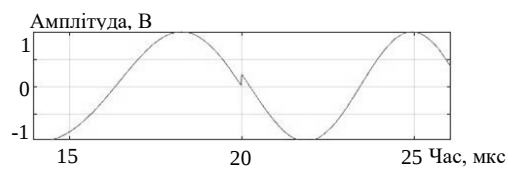


б)

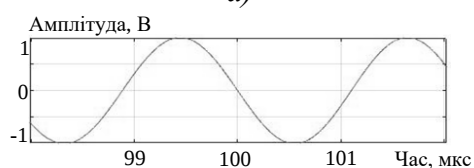
Рис. 1. Графіки зміни миттєвої частоти трифрагментних НЛЧМ-сигналів



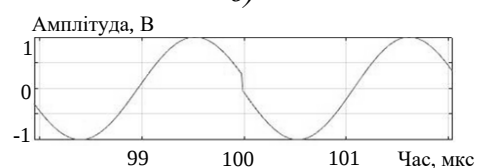
а)



б)

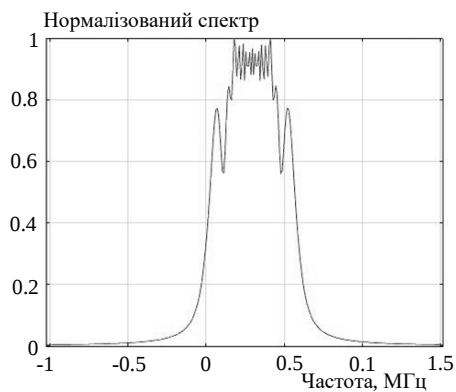


в)

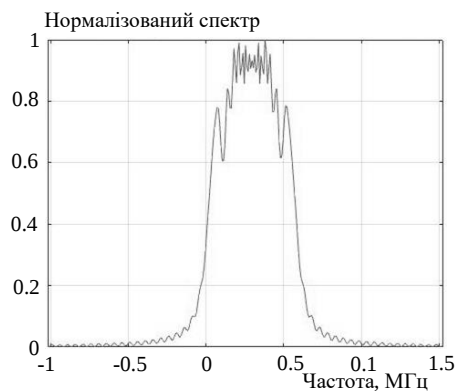


г)

Рис. 2. Осцилограми трифрагментних НЛЧМ-сигналів на стиках першого (а, б) та другого (в, г) фрагментів

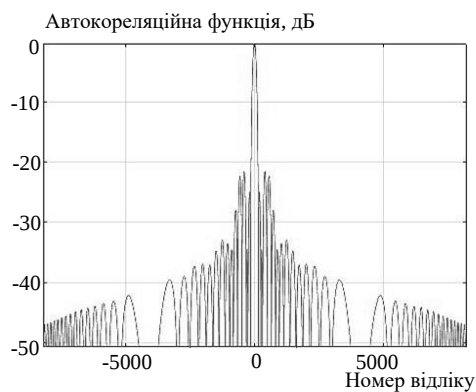


а)

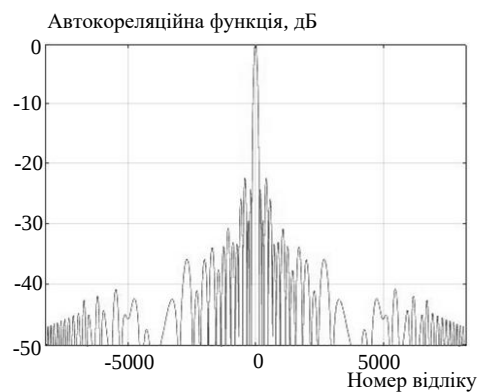


б)

Рис. 3. АЧС трифрагментних НЛЧМ-сигналів



а)



б)

Рис. 4. АКФ трифрагментних НЛЧМ-сигналів

Аналіз рис. 1–4 показує:

графіки зміни частоти рис. 1а, 1б повністю збігаються, стрибки частоти на стиках ЛЧМ фрагментів скомпенсовано;

осцилограми на рис. 2а, 2в не має розривів, тобто компенсаційні складові стрибків миттєвої фази на стиках фрагментів розраховано правильно. Осцилограми на рис. 2б, 2г демонструють наявність додатково введених стрибків фази;

на АЧС сигналів (рис. 3а та 3б) мають місце відмінності: переходи між фрагментами згладилися, тобто найбільші крайові перепади амплітуди на рис. 3б стали меншими, загальне округлення покращилося, однак на бічних скатах з'явилися пульсації, що є свідченням появи фазових спотворень;

АКФ на рис. 4а не демонструє фазових викривлень на відміну від рис. 4б, на якому бачимо хаотичність розподілу БП у районі головної пелюстки, на віддаленні від неї має місце різка зміна РБП типу «сходінка». Ці відмінності є наслідком введення в сигнал додаткових фазових зсувів, які й забезпечили зниження МРБП.

Висновки. У роботі для ММ дво- та трифрагментних НЛЧМ-сигналів із компенсацією міжфрагментних частотно-фазових стрибків вперше запропоновано метод зниження МРБП, який полягає у введенні передспотворення фазової структури на стиках фрагментів. Попередня компенсація стрибків миттєвої частоти та фази на стиках фрагментів забезпечує знаходження точки фазової рівноваги ММ, відносно якої можна здійснювати фазові зміни для перерозподілу РБП АКФ. Наслідком такого перерозподілу є зниження МРБП, застосування цього методу було найефективнішим для сигналів виду КкЧМ – ЛЧМ (МРБП зменшився на 2,33 дБ). Найнижчий МРБП -24,63 дБ зафіксовано для сигналу в складі трьох ЛЧМ фрагментів, при цьому зниження за рахунок передспотворення фазової структури становить 1,11 дБ.

Величини фазових стрибків є відмінними для різних параметрів та видів НЛЧМ-сигналів, вони зменшуються на наступних стиках фрагментів зі збільшенням частоти сигналу. Однак слід зауважити, що введення значного стрибка фази ($> 0,3\pi$) може призвести до суттєвого викривлення (провалу) АЧС, у результаті чого може статися його розузгодження з амплітудно-частотною характеристикою радіопередавального тракту, чого не слід допускати. Також спостерігається зменшення потрібної величини фазових стрибків у разі збільшення бази сигналу.

Практичне застосування запропонованого методу зниження МРБП забезпечить покращення тактико-технічних характеристик радіолокаційних засобів із виявлення повітряних об'єктів за рахунок підвищення ймовірності виявлення малорозмірних повітряних цілей на тлі стаціонарних пасивних перешкод.

У подальшому планується дослідити ефективність та особливості застосування запропонованого методу для НЛЧМ-сигналів інших видів та з більшою кількістю фрагментів.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Cook C. E., Bernfeld M. Radar Signals: An Introduction to Theory and Application. Boston : Artech House, 1993. 552 p.

2. Meikle H. Modern Radar Systems. 2nd ed. Norwood : Artech House, Inc., 2008. 701 p.
3. Levanon N., Mozeson E. Radar Signals. Hoboken. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2004. 432 p. <https://doi.org/10.1002/0471663085>
4. Assessment of the Quality of Detection of a Radar Signal with Nonlinear Frequency Modulation in the Presence of a Non-Stationary Interfering Background / A. A. Hryzo, O. O. Kostyria, A. V. Fedorov et al. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2025. Vol. 1 (72). P. 18–29. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-1-2>
5. Mathematical Model of a Two-Fragment Signal with a Non-Linear Frequency Modulation in the Current Period of Time / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, O. M. Dodukh et al. // Visnyk NTUU KPI. Seriiia – Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia. 2023. Vol. 92. P. 60–67. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.92.60-67>
6. Mathematical Model of the Current Time for Three-Fragment Radar Signal with Non-Linear Frequency Modulation / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, O. M. Dodukh et al. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2023. № 3 (63). P. 17–26. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-3-2>
7. Кости́ря О. О., Гризо А. А., Додух О. М. Компенсація спотворень частотно-часової структури комбінованого сигналу за умови різної кількості похідних миттєвої фази його фрагментів // 36. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. 2023. № 4 (78). С. 70–75. <https://doi.org/10.30748/zhups.2023.78.10>
8. Mathematical Model of Current Time of Signal from Serial Combination Linear-Frequency and Quadratically Modulated Fragments / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, H. V. Khudov et al. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2024. Vol. 2 (69). P. 24–33. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-3>
9. Two-Fragment Non-Linear-Frequency Modulated Signals with Roots of Quadratic and Linear Laws Frequency Changes / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, H. V. Khudov et al. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2024. Vol. 1 (68). P. 17–27. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-2>
10. Кости́ря О. О., Гризо А. А., Додух О. М. Комбіновані двофрагментні радіолокаційні сигнали з лінійним та експоненціальним законами частотної модуляції // Системи озброєння та військової техніки. 2024. № 4 (76). С. 58–64. <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.76.06>
11. Improvement of Mathematical Models with Time-Shift of Two- and Tri-Fragment Signals with Non-Linear Frequency Modulation / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, O. M. Dodukh et al. // Visnyk NTUU KPI. Seriiia – Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia. 2023. Vol. 93. P. 22–30. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.93.22-30>
12. Mathematical Model of Shifted Time of Combined Signals Part of Fragments with Linear and Quadratic Frequency Modulation / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, Yu. S. Solomonenko et al. // Visnyk NTUU KPI. Seriiia – Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia. 2024. Vol. 97. P. 5–11. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.97.5-11>
13. Кости́ря О. О., Гризо А. А., Додух О. М. Синтез математичної моделі зі зсувом часу комбінованого сигналу з лінійною та кубічною модуляцією частоти // Системи обробки інформації. 2024. № 1 (176). С. 73–81. <https://doi.org/10.30748/soi.2024.176.09>
14. Non-Continuous Piecewise Nonlinear Frequency Modulation Pulse with Variable Sub-Pulse Duration in a MIMO SAR Radar System / Yu. Zhaoa, M. Ritchieb, X. Lua et al. // Remote Sensing Letters. 2020. Vol. 11 (3). P. 283–292. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1711237>

15. Anoocha Ch., Krishna B. T. Peak Side Lobe Reduction Analysis of NLFM and Improved NLFM Radar Signal with Non-Uniform PRI // *Aiub Journal of Science and Engineering (AJSE)*. 2022. Vol. 21 (2). P. 125–131. <https://doi.org/10.53799/ajse.v21i2.440>
16. Magneto-Acousto-Electrical Tomography Using Nonlinearly Frequency-Modulated Ultrasound / Z. Cheng, Z. Sun, J. Wang et al. // *Phys. Med. Biol.* 2024. Vol. 69 (8). PMID: 38422542. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ad2ee5>
17. Nonlinear Frequency Modulation Tfm with Second-Order Tgv and Butterworth Filter for Detection of Cfrp Composites / Shen Peng, Jing Jian, Luo Zhitao et al. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4747512>
18. Method for Studying the Time-Shifted Mathematical Model of a Two-Fragment Signal with Nonlinear Frequency Modulation / O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, I. M. Trofymov et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2025. Vol. 3 (74). P. 6–16. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-3-1>

Стаття надійшла до редакції 21.10.2025.

REFERENCES

1. Cook, C. E., & Bernfeld, M. (1993). *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application*. Boston, Artech House.
2. Meikle, H. (2008). *Modern Radar Systems*. (2nd ed.). Norwood: Artech House, Inc.
3. Levanon, N., & Mozeson, E. (2004). *Radar Signals*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471663085>
4. Hryzo, A. A., Kostyria, O. O., & Fedorov, A. V. et al. (2025). Assessment of the Quality of Detection of a Radar Signal with Nonlinear Frequency Modulation in the Presence of a Non-Stationary Interfering Background. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1 (72), 18–29. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-1-2>
5. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Dodukh, O. M. et al. (2023). Mathematical Model of a Two-Fragment Signal with a Non-Linear Frequency Modulation in the Current Period of Time. *Visnyk NTUU KPI Seriiia – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia [Bulletin NTUU KPI. Series – Radio Engineering. Radio Equipment Manufacturing]*, 92, 60–67. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.92.60-67>
6. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Dodukh, O. M. et al. (2023). Mathematical Model of the Current Time for Three-Fragment Radar Signal With Non-Linear Frequency Modulation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 3 (63), 17–26. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-3-2>
7. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Dodukh, O. M. (2023). Kompensatsiia spotvoren chastotno-chasovoi struktury kombinovanoho syhnalu za umovy riznoi kilkosti pokhidnykh myttievoi fazy yoho frahmentiv [Compensation for Distortions of the Frequency-Time Structure of the Combined Signal Under the Condition of Different Number of Derivatives of the Instantaneous Phase of Its Fragments]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Scientific Works of Kharkiv National Air Force University]*, 4 (78), 70–75. <https://doi.org/10.30748/zhups.2023.78.10> [in Ukrainian].
8. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Khudov, H. V. et al. (2024). Mathematical Model of Current Time of Signal From Serial Combination Linear-Frequency and Quadratically Modulated

Fragments. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2 (69), 24–33. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-2-3>

9 Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Khudov, H. V. et al. (2024). Two-Fragment Non-Linear-Frequency Modulated Signals with Roots of Quadratic and Linear Laws Frequency Changes. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1 (68), 17–27. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-2>

10. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Dodukh, O. M. (2024). Kombinovani dvofrahmentni radiolokatsiini syhnaly z liniinym ta eksponentsialnym zakonamy chastotnoi moduliatsii [Combined Two-Fragment Radar Signals with Linear and Exponential Frequency Modulation Laws]. *Systemy ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Systems of Arms and Military Equipment]*, 4 (76), 58–64. <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.76.06> [in Ukrainian].

11. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Dodukh, O. M. et al. (2023). Improvement of Mathematical Models with Time-Shift of Two- and Tri-Fragment Signals with Non-Linear Frequency Modulation. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia [Bulletin NTUU KPI. Series – Radio Engineering. Radio Equipment Manufacturing]*, 93, 22–30. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.93.22-30>

12. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Solomonenko, Yu. S. et al. (2024). Mathematical Model of Shifted Time of Combined Signals Part of Fragments with Linear and Quadratic Frequency. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia [Bulletin NTUU KPI. Series – Radio Engineering. Radio Equipment Manufacturing]*, 97, 5–11. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.97.5-11>

13. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Dodukh, O. M. (2024). Syntez matematychnoi modeli zi zsumom chasu kombinovanoho syhnalu z liniinoiu ta kubichnoiu moduliatsiieiu chastoty [Synthesis of the Time-Shifted Mathematical Model of a Combined Signal with Linear and Cubic Frequency Modulation]. *Systemy obrobky informatsii [Information Processing Systems]*, 1 (176), 73–81. <https://doi.org/10.30748/soi.2024.176.09> [in Ukrainian].

14. Zhaoa, Yu., Ritchieb, M., & Lua, X. et al. (2020). Non-Continuous Piecewise Nonlinear Frequency Modulation Pulse with Variable Sub-Pulse Duration in a MIMO SAR Radar System. *Remote Sensing Letters*, 11 (3), 283–292. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1711237>

15. Anoosha, Ch, & Krishna, B. T. (2022). Peak Side Lobe Reduction Analysis of NLFM and Improved NLFM Radar Signal with Non-Uniform PRI. *Aiub Journal of Science and Engineering (AJSE)*, 21 (2), 125–131. <https://doi.org/10.53799/ajse.v21i2.440>

16. Cheng, Z., Sun, Z., & Wang, J. et al. (2024). Magneto-Acousto-Electrical Tomography using Nonlinearly Frequency-Modulated Ultrasound. *Phys Med Biol*, 69 (8), PMID: 38422542. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ad2ee5>

17. Shen Peng, Jing Jian, Luo Zhitao et al. (2024). Nonlinear Frequency Modulation Tfm with Second-Order Tgv and Butterworth Filter for Detection of Cfrp Composites. *Available at SSRN*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4747512>

18. Kostyria, O. O., Hryzo, A. A., & Trofymov, I. M. et al. (2025). Method for Studying the Time-Shifted Mathematical Model of a Two-Fragment Signal with Nonlinear Frequency Modulation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 3 (74), 6–16. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-3-1>

O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, O. M. Pylypovych, I. O. Romanenko

PHASE PRE-DISTORTION METHOD FOR REDUCING THE SIDELobe LEVEL OF THE AUTOCORRELATION FUNCTION OF NONLINEAR FREQUENCY-MODULATED SIGNAL

One of the key stages in the development of radar systems was the introduction of complex signals with intra-pulse frequency or phase modulation, which made it possible to increase the duration and thus the energy of probing signals without loss of range resolution due to echo-signal compression in matched filters. A negative consequence of using such signals is the presence of sidelobes in their autocorrelation functions. For signals with linear frequency modulation, the relative sidelobe level typically reaches -13 dB. The sidelobe background effectively “stretches” the range extent of passive interference, reducing the potential detection capability of radar systems. Reducing the maximum sidelobe level of the signal at the output of the matched filter is therefore an important task that can be addressed by employing nonlinear frequency-modulated (NLFM) signals.

This paper focuses on the development of a method for reducing the maximum sidelobe level of the autocorrelation function of multiframe NLFM signals by introducing additional instantaneous phase jumps at the boundaries between fragments. The distinguishing feature of the proposed method, compared to known approaches, is that it is applied to mathematical models that enable the calculation and compensation of frequency-phase distortions at the moments of transition between signal fragments. An analysis of existing publications indicates that the phase pre-distortion method has not previously been applied to such models. Thus, the aim of this study is to determine the feasibility of introducing additional instantaneous phase jumps at the transitions between fragments of nonlinear frequency-modulated signals. Two- and three-fragment signals are considered, consisting of both linearly and nonlinearly frequency-modulated fragments. The research confirms that it is possible to select such phase-jump values that reduce the maximum sidelobe level. For the analyzed signal parameters, the maximum reduction achieved is 2.33 dB. The lowest observed maximum sidelobe level, -24.63 dB, was obtained for a three-fragment signal with linear frequency modulation, where the introduction of additional instantaneous phase jumps provided a 1.11 dB reduction.

Keywords: nonlinear frequency-modulated signals; mathematical model; instantaneous phase and frequency jump; autocorrelation function; maximum sidelobe level.

О. Ф. Дубина, С. О. Соболенко, О. В. Андрєєв, В. Г. Парфєнюк, О. В. Гераймович

ВИЗНАЧЕННЯ РЕАЛЬНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Предметом дослідження є система відеоспостереження інтегрованої системи захисту об'єктів.

У статті розглянуто підхід до оцінювання ефективності системи захисту об'єктів, а також обґрунтовано важливість визначення такого цифрового параметра, як роздільна здатність. Проаналізовано вимоги європейського стандарту EN 50 132-7 для класифікації, розпізнавання та ідентифікації об'єктів на цифрових зображеннях. Зроблено висновок, що проєктувальник та замовник повинні визначитися з метою встановлення кожної камери (розпізнавання людей, ідентифікація, виявлення, спостереження). Проєктувальник повинен знайти золоту середину між вищою щільністю пікселів, що дозволяє бачити більше деталей під меншим кутом огляду, та більшою шириною огляду камери під більшим кутом перегляду, що дозволяє зменшити кількість камер у проєкті.

Проаналізовано фактори, що впливають на якість цифрового зображення. Зроблено висновок, що для визначення реальної роздільної здатності зображення і, відповідно, імовірності належної класифікації об'єктів систем відеоспостереження необхідно враховувати багато факторів, які знаходяться в певній суперечності один з одним, і цей процес не підлягає аналітичному моделюванню. Основні фактори включають: розрізнення, освітлення під час знімання, відстань до об'єкта, глибину різкості.

Використання вимог європейського стандарту EN 50 132-7 можливе лише в ідеальних умовах знімання та технічних характеристик відеокамер. Для систем відеоспостереження характерні зміни умов знімання (час доби, року, різні кліматичні та погодні умови, значні відстані за глибиною та шириною розміщення об'єкта, що знімається). У цьому разі пропонується алгоритм для визначення реальної роздільної здатності зображення IP -відеокамери за допомогою теорії нечіткої логіки (Fuzzy Logic) або нечіткого виведення. Цей алгоритм оцінює ступінь відповідності умов знімання до ідеальних умов, у яких можна застосувати стандарт EN 50 132-7 для класифікації об'єктів на цифрових зображеннях.

Ключові слова: відеоспостереження; відеокамера; роздільна здатність; нечітка логіка; цифрове зображення.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Дослідження методів класифікації об'єктів на зображеннях є недостатньо вивченою сферою технічних знань. Це пов'язано з неможливістю передбачення всіх факторів для формування зображення об'єкта на знімку через певну невизначеність.

© О. Ф. Дубина, С. О. Соболенко, О. В. Андрєєв, В. Г. Парфєнюк, О. В. Гераймович, 2025

Для визначення реальної роздільної здатності зображення і, відповідно, імовірності правильної класифікації об'єктів системами відеоспостереження необхідно враховувати певну кількість чинників, що знаходяться в деякій суперечності один з одним. До основних таких чинників належать: розрізнення, освітленість під час знімання, дальність до об'єкта, глибина різкості.

Застосування вимог європейського стандарту EN 50 132-7 для виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів на цифрових зображеннях можливе лише за ідеальних умов знімання і технічних характеристик відеокамер.

Для систем відеоспостереження характерне виконання завдань під час мінливих умов знімання (пори доби, року, різних кліматичних і погодних умов, значних відстаней за глибиною і шириною об'єкта, що охороняється).

У статті запропоновано використовувати теорію нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що визначає сучасний підхід до опису розпізнавання та ідентифікації об'єктів на зображеннях за знімками, отриманими за допомогою IP-відеокамер в умовах певної невизначеності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання використання теорії нечіткої логіки висвітлили у своїх наукових працях такі українські та закордонні вчені, як: Асаї К., Борисов А. Н., Гордієнко І. В., Семененко М. В., Мітюшкін Ю. І., Мокін Б. І. та інші.

Аналіз публікацій закордонних [1–4] та вітчизняних [5–8] фахівців свідчить, що класичні методи розпізнавання об'єктів на знімках досить ефективно працюють у разі повністю детермінованих і постійних умов знімання.

Водночас для систем з апріорною невизначеністю оптимальними є нечіткі методи аналізу, які слід адаптувати до сучасної системи оброблення зображень.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є дослідження чинників, що впливають на якість цифрового зображення, та розроблення алгоритму визначення реальної роздільної здатності зображення IP-відеокамери з використанням теорії нечіткої логіки.

Виклад основного матеріалу. Безпека об'єкта – це стан його захищеності від загроз, заподіяння шкоди життю чи здоров'ю людей, майну фізичних або юридичних осіб, державному чи муніципальному майну, технічним станам, інфраструктурі життєзабезпечення, інтер'єру ландшафтної архітектури, навколишньому природному середовищу [9].

У загальному випадку для побудови систем охорони з використанням імовірнісного підходу показник ефективності та надійності інтегрованої системи охорони можна записати в аналітичному вигляді, як

$$W_e = P_O, P_{KL}, P_{CB}, P_H^D, P_{CB}^{K3}, \quad (1)$$

де P_O – імовірність виявлення об'єкта датчиками;

P_{KL} – імовірність правильної класифікації об'єктів датчиками;

P_{CB} – імовірність своєчасності обробки інформації;

P_H^D – імовірність безвідмовної роботи датчика;

P_{CB}^{K3} – своєчасність передачі інформації каналом передачі даних [9, 13].

Найкраща ефективність функціонування сучасних інтегрованих систем охорони забезпечується шляхом використання систем відеоспостереження, які здійснюють візуальний контроль за об'єктом охорони [10].

Розглянемо основні параметри, що впливають на ймовірності виявлення і правильної класифікації об'єктів за допомогою систем відеоспостереження.

Необхідне розрізнення. Сучасні мережеві IP-камери здатні забезпечувати високий рівень деталізації, вимоги до роздільної здатності задаються в пікселях, а також доповнюються альтернативним параметром – кількістю міліметрів об'єкта, що припадають на один піксель отриманого зображення (див. табл. 1). У спеціалізованій літературі про системи відеоспостереження поширеним є використання зворотного показника – щільності пікселів, тобто кількості пікселів на метр заданої дистанції від об'єкта спостереження.

Таблиця 1

Вимоги європейського стандарту EN 50 132-7 для виявлення, розпізнавання та ідентифікації

Вид активності	Завдання і можливості	Старий параметр, % висоти	Альтернативний параметр, мм/піксель	Кількість пікселів на 1 м по горизонталі
Моніторинг	Моніторинг і контроль	5% від висоти кадра	80	12
Детектування	Гарантоване виявлення людей у кадрі	10% від висоти кадра	40	25
Спостереження	Виявлення характерних ознак людини (наприклад, одягу)	25% від висоти кадра	16	62
Розпізнавання	Розпізнавання відомих оператору людей	50% від висоти кадра	8	125
Ідентифікація	Якість, достатня для ідентифікації людини	100% від висоти екрана	4	250
Інспектування	Можливість 100% ідентифікації	400% від висоти екрана	1	1000

Для різних типів об'єктів застосовують специфічні критерії. Наприклад, для коректного читання номерних знаків висота символів має становити близько 15 пікселів, що еквівалентно близько 200 пікселям на метр. Це означає, що як проєктувальник, так і замовник повинні чітко визначити цільове завдання кожної встановлюваної камери: розпізнавання осіб, ідентифікація, детектування чи загальне спостереження. Вибір зони огляду камери має базуватися на розрахунках щільності пікселів у межах цієї зони за заданих параметрів камери та об'єктива, щоб забезпечити виконання поставлених завдань.

Проєктувальник повинен знаходити баланс між високою щільністю пікселів, яка дозволяє розгледіти більше деталей за меншого кута огляду, і широкою зоною охоплення камери за більшого кута огляду, що скорочує потребу у великій кількості обладнання в проєкті.

Наприклад, для камер виробника Hikvision вимоги до ступеня розрізняювальності об'єктів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Вимоги, рекомендовані Hikvision для виявлення, розпізнавання та ідентифікації

Експлуатаційні вимоги	Кількість пікселів по горизонталі для обличчя	Пікселів на дюйм
Ідентифікація (за несприятливих умов)	80	12,5
Ідентифікація (за несприятливих умов)	40	6,3
Розпізнавання	20	3,2
Виявлення	4	0,6

На рис. 1 показано вигляд трьох варіантів експлуатаційних критеріїв виявлення, розпізнавання та ідентифікації практично.



Рис. 1. Вигляд трьох варіантів експлуатаційних критеріїв практично

Глибина різкості є важливим параметром, оскільки визначає діапазон, у якому об'єкти залишатимуться у фокусі, її збільшення сприяє вищій імовірності їх ідентифікації. Цей показник залежить від ступеня відкриття діафрагми, фокусної відстані об'єктива та дистанції до камери (див. рис. 2).

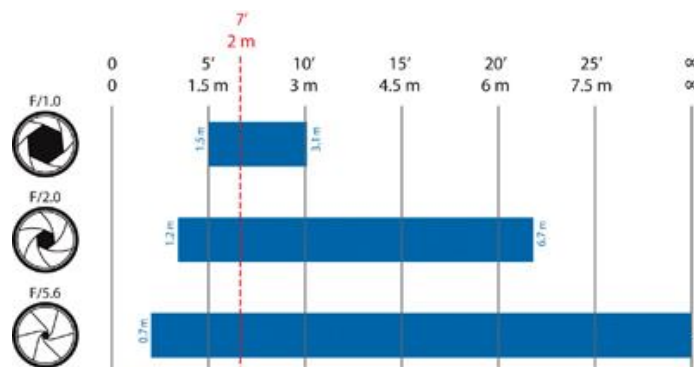


Рис. 2. Залежність глибини різкості від параметрів діафрагми

Глибина різкості збільшується в разі зменшення діафрагми, що потребує достатнього освітлення для досягнення якісного результату. У деяких камерах Hikvision є функція P-Iris, яка дозволяє автоматично налаштовувати діафрагму, забезпечуючи оптимальну глибину різкості залежно від наявних умов освітлення. Розмір відкриття Iris-діафрагми впливає на кількість світла, що проходить через об'єтив і потрапляє на матрицю. Менше значення числа F відповідає максимально відкритій діафрагмі, а більше свідчить про її мінімальне відкриття. Чим нижче F , тим вища якість зображення за умов слабого освітлення, а за більшого числа F легше скоригувати картинку в ситуаціях із заднім засвіченням. У разі мінімального F -числа також забезпечується максимальна глибина різкості (див. рис. 3).

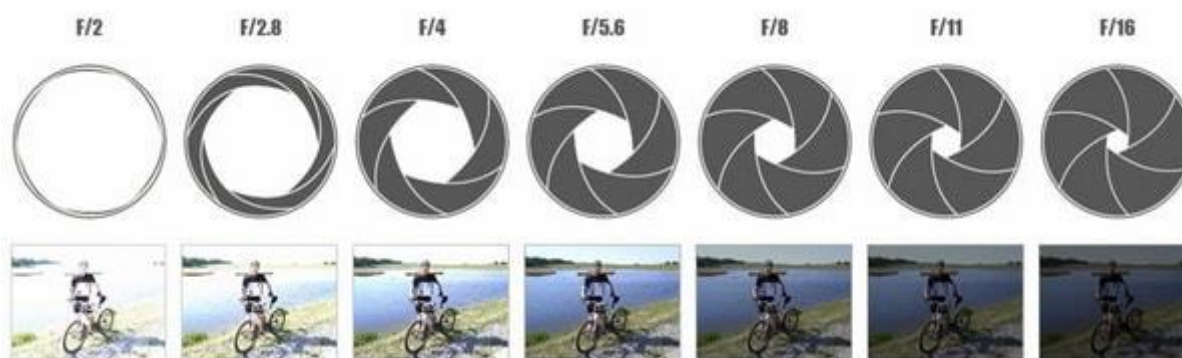


Рис. 3. Залежність яскравості й чіткості зображення від діафрагми

Глибина різкості збільшується за використання коротших фокусних відстаней. Камери з більш високою роздільною здатністю дають змогу знімати, використовуючи короткі фокусні відстані, при цьому дотримуючись вимог до роздільної здатності.

Освітлення суттєво впливає на можливості розпізнавання людей та об'єктів. Тіні, підвищений контраст і контрове підсвічування значно ускладнюють ідентифікацію порівняно з більш сприятливими умовами освітлення. Наприклад, хороші освітлювальні умови поза приміщеннями значно поліпшують результати порівняно зі складнішими обставинами, зокрема в офісних коридорах чи на станції метро. Для знімання на відстані 15–20 м, коли обличчя займає близько 80 пікселів у ширину, потрібен об'єтив із фокусною відстанню 50 мм. Однак навіть за такої роздільної здатності ідентифікація може бути ненадійною за освітлення на рівні 100–150 лк, що є типовим для закритих приміщень. У таких обставинах допоможуть спеціальні функції камери, наприклад, широкий динамічний діапазон або сенсори з високою світлочутливістю. Найкращих результатів можна досягти шляхом поєднання цих функцій із додатковим освітленням та розташуванням камери таким чином, щоб уникати контрового підсвічування. У разі зовнішнього відеоспостереження слід враховувати зміну інтенсивності й напрямку сонячного світла протягом дня.

Освітленість також залежить від погодних умов: сніговий покрив значно збільшує відбивання світла, тоді як дощ або мокрий асфальт поглинають його, знижуючи видимість. Для якісної ідентифікації людини рекомендується використовувати рівномірне

освітлення інтенсивністю 300–500 лк. Для розпізнавання номерних знаків достатньо рівня освітлення в межах 150 лк. За слабого освітлення світлочутлива матриця камери створює значний шум, який негативно позначається на якості зображення (див. рис. 4). Це може ускладнити ідентифікацію. У разі будь-якої освітленості доводиться шукати компроміс між шумом, витримкою та глибиною різкості, але чим кращі умови освітлення, тим сприятливіше поєднання цих параметрів можна вибрати.



Рис. 4. Вплив освітлення на ідентифікацію об'єктів: А) освітленість близько 1600 лк та сприятливий напрям світла; В) освітленість 350 лк, але є фонове засвічення; С) освітленість 7 лк та сприятливий напрямок світла; D) освітленість 1,5 лк

Алгоритм визначення реальної роздільної здатності зображення ІР-відеокамери з використанням теорії нечіткої логіки. Проведений аналіз показав, що для визначення реальної роздільної здатності зображення і, відповідно, імовірності правильної класифікації об'єктів системами відеоспостереження необхідно враховувати багато чинників, які знаходяться в певній суперечності один із одним, і цей процес не піддається аналітичному моделюванню.

Застосування табл. 1, 2 можливе лише за ідеальних умов знімання і технічних характеристик відеокамер.

Під час проектування системи охорони необхідно проводити певні розрахунки для правильного вибору технічних параметрів і характеристик відеокамер, місця їх розміщення, режимів роботи тощо. На сьогоднішній день цей процес, як правило, здійснюється за допомогою спеціалізованих систем автоматизованого проектування (САПР). Вибір обладнання з максимально кращими параметрами не завжди себе виправдує за критерієм витрати – якість.

У цьому разі пропонуємо запроваджувати алгоритм визначення реальної роздільної здатності зображення ІР-відеокамери з використанням теорії нечіткої логіки (Fuzzy Logic) або нечіткого виведення. Він буде оцінювати ступінь відповідності умов знімання ідеальним умовам, за яких можливо застосовувати значення табл. 1, 2 для класифікації об'єктів на зображеннях. Схему алгоритму наведено на рис. 5.

Нечітке виведення займає центральне місце в системах нечіткого моделювання. Процес нечіткого виведення являє собою певну процедуру або алгоритм отримання нечітких виведень на підставі нечітких передумов із використанням основних операцій нечіткої логіки. Основні етапи нечіткого виведення:

визначення структури системи нечіткого виведення;

формування бази правил системи нечіткого виведення;
фазифікація вхідних змінних;
обчислення значень ступенів належності підумови правил нечітких продукцій;
агрегування підумови правил нечітких продукцій;
активізація підумов правил нечітких продукцій;
акумулювання виведень правил нечітких продукцій;
дефазифікація вихідних змінних [11].



Рис. 5. Алгоритм визначення реальної роздільної здатності зображення IP-відеокамери з використанням теорії нечіткої логіки

До теперішнього часу запропоновано кілька алгоритмів нечіткого виведення [12]. Найбільше застосування в системах нечіткого виведення отримав алгоритм Мамдані.

Для побудови нечіткої системи на основі розробленого алгоритму потрібно для початку задати вхідні дані, а також кінцевий результат. На вході було задано такі значення: освітленість, діафрагму, необхідну глибину.

На виході отримано коефіцієнт відповідності ($0...1$) і реальну роздільну здатність зображення, що отримується цією відеокамерою. Це надає можливість проводити лише відповідні етапи класифікації: моніторинг, детектування, спостереження, розпізнавання, ідентифікацію, інспектування. База правил системи нечіткого виведення призначена для формального подання емпіричних знань або знань експертів у тій чи іншій проблемній сфері. У системах нечіткого виведення використовуються правила нечітких продукцій, у яких умови та твердження сформульовані в термінах нечітких лінгвістичних висловлювань. База правил нечітких продукцій – це кінцева множина правил нечітких продукцій, узгоджених щодо використовуваних у ній лінгвістичних змінних. Найчастіше база правил надається у формі певного структурованого тексту.

Нехай база нечітких правил прийняття рішень містить визначені експертами залежності рівня відповідності роздільної здатності **вимогам європейського стандарту EN 50 132-7 для виявлення, розпізнавання та ідентифікації** (відповідність) від рівня освітленості та значення діафрагми. Діафрагма визначає відстань за глибиною, де зображення буде чітким, тому достатньо ввести лише дві вхідні лінгвістичні змінні: освітленість = (висока, низька); діафрагма = (велика, мала); і одну вихідну – відповідність = (висока, середня, низька).

Наведемо декілька з можливих правил:

R_1 : якщо діафрагма є великою і освітленість є високою, то відповідність є високою;

R_2 : якщо діафрагма є малою і освітленість є високою, то відповідність є середньою;

R_3 : якщо діафрагма є великою і освітленість є низькою, то відповідність є середньою;

Допустимо, що лінгвістичні терми входів описуються такими нечіткими множинами:

велика діафрагма = $\{2/0.2; 4/0.4; 8/0.8; 16/1\}$;

мала діафрагма = $\{2/1; 4/0.8; 8/0.6; 16/0.4\}$;

висока освітленість = $\{2/0.1; 50/0.8; 150/0.9; 400/1\}$;

низька освітленість = $\{2/1; 50/0.3; 150/0.2; 400/0.1\}$.

Терми виходу описуються такими множинами:

висока відповідність = $\{0/0.1; 0.5/0.5; 1/1\}$;

середня відповідність = $\{0/0.5; 0.5/1; 1/0.5\}$.

Необхідно визначити відповідність за невеликої діафрагми та середньої освітленості.

Звернемо увагу на те, що вхідні дані не визначають таких термів: незначна діафрагма та середня освітленість. Вихідну реакцію на ці нечіткі значення необхідно отримати в процесі логічного виведення на основі бази правил.

Нехай на вхід системи надходять нечіткі множини діафрагми $A_1' = \{2/0.4; 4/0.3; 8/0.2; 16/0.1\}$ та освітленості $A_2' = \{2/0.1; 50/0.8; 150/0.8; 400/0.1\}$.

Операції визначення мінімуму та максимуму позначимо у вигляді $\wedge$ та $\vee$ відповідно. Для обчислення виходу виконаємо етапи нечіткого логічного виведення.

1. Обчислення рівнів істинності правил

$\alpha_1 = \min[\max(0.4^0.2, 0.3^0.4, 0.2^0.8, 0.1^1), \max(0.1^0.1, 0.8^0.8, 0.8^0.9, 0.1^1)] = \min[\max(0.2, 0.3, 0.2, 0.1), \max(0.1, 0.8, 0.8, 0.1)] = \min[0.3, 0.8] = 0.3;$

$\alpha_2 = \min[\max(0.4^1, 0.3^0.8, 0.2^0.6, 0.1^0.4), \max(0.1^0.1, 0.8^0.8, 0.8^0.9, 0.1^1)] =$

$\min[\max(0.4, 0.3, 0.2, 0.1), \max(0.1, 0.8, 0.8, 0.1)] = \min[0.4, 0.8] = 0.4;$

$\alpha_3 = \min[\max(0.4^{0.2}, 0.3^{0.4}, 0.2^{0.8}, 0.1^1), \max(0.1^1, 0.8^{0.3}, 0.8^{0.2}, 0.1^{0.1})] = \min[\max(0.2, 0.3, 0.2, 0.1), \max(0.1, 0.3, 0.2, 0.1)] = \min[0.3, 0.3] = 0.3.$

2. Обчислення виходів правил

$B_1' = \{0/\min(0.3, 0.1), 0.5/\min(0.3, 0.5), 1/\min(0.3, 1)\} = \{0/0.1, 0.5/0.3, 1/0.3\};$

$B_2' = \{0/\min(0.4, 0.5), 0.5/\min(0.4, 1), 1/\min(0.4, 0.5)\} = \{0/0.4, 0.5/0.4, 1/0.4\};$

$B_3' = \{0/\min(0.3, 0.5), 0.5/\min(0.3, 1), 1/\min(0.3, 0.5)\} = \{0/0.3, 0.5/0.3, 1/0.3\}.$

3. Агрегування виходів

$B' = B_1' \vee B_2' \vee B_3' = \{0/\max(0.1, 0.4, 0.3), 0.5/\max(0.3, 0.4, 0.3), 1/\max(0.3, 0.4, 0.3)\} = \{0/0.4, 0.5/0.4, 1/0.4\}.$

4. Дефазифікація виходу

$$y = \frac{0 * 0.4 + 0.5 * 0.4 + 1 * 0.4}{0.4 + 0.4 + 0.4} = 0.5.$$

Отже, для заданих нечітких множин за невеликої діафрагми та середньої освітленості відповідність роздільної здатності **вимогам європейського стандарту EN 50132-7 для виявлення, розпізнавання та ідентифікації** становить 50%.

Висновки. У цій статті запропоновано алгоритм оцінювання ступеня відповідності умов знімання умовам, за яких можливо застосовувати значення вимог європейського стандарту EN 50 132-7 для виявлення, розпізнавання та ідентифікації на основі нечітко-множинного підходу, який дозволяє враховувати якісні аспекти, які не мають точної числової оцінки. Залучення експертів для формування бази нечітких правил прийняття рішень теоретично повинно бути для кожного зразка, але можна обмежитися певним виробником із врахуванням заявленої роздільної здатності. Цей підхід може бути корисним на етапах проєктування систем відеоспостереження та систем контролю й управління доступом із використанням фотофіксації.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Edge-Detection Method for Image Processing Based on Generalized Type-2 Fuzzy Logic / M. Patricia, I. Claudia, R. Juan et al. // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2014. Vol. 22 (6). P. 1515–1525. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2013.2297159>
2. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, & J. Sun // In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR–2016). Image Processing and Computer Vision. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
3. Amza C. G., Nitoi D. F., Enciu G. Automatic Image Processing for Welding Inspection // In Proc. of the 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Technologies (INMAT 13). Vouliagmeni, Athens, Greece, May 14–16, 2013. P. 153–158. ISSN 2227-4596.
4. Catalin Gheorghe Amza, Dumitru Titi Cicic. Industrial Image Processing Using Fuzzy-Logic // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (DAAAM). Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 492–498. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.404>

5. Використання даних дистанційного зондування для визначення рівня забур'яненості кукурудзяних полів / Т. П. Федонюк, П. В. Пивовар, П. П. Топольницький та ін. // Agriculture. № 15 (7). С. 711. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.1580.v1>
6. Гангалю І. М., Лісовий Д. О., Жебка В. В. Розпізнавання об'єктів за допомогою технологій комп'ютерного зору // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. Вип. 4 (77). С. 46–52. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.044652>
7. Омельченко С. О. Використання комп'ютерного зору для розпізнавання образів // Глобалізація наукових знань: міжнародна співпраця та інтеграція галузей наук : матеріали II Міжнар. студент. наук. конф. (22 жовтня 2021 р.). Т. 1, Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. С. 108–110. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/20567> (дата звернення: 28.09.2025).
8. Романча А. П., Борисов Д. В., Подорожняк А. О. Дослідження сучасних систем комп'ютерного зору // Проблеми інформатизації : тези доповідей сьомої міжнар. наук.-техніч. конф. (13–15 листопада 2019 р.). Черкаси : ЧДТУ, 2019. С. 53.
9. Evaluation of the Effectiveness of the Integrated Security System as an Information System / T. Vakaliuk, O. Dubyna, T. Nikitchuk, O. Andreiev // Proceedings of the 11th International Conference "Information Control Systems & Technologies", (September 21–23, 2023). Odesa, Ukraine. CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3513. P. 16–26. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper02.pdf> (last accessed: 20.09.2025).
10. Електронні елементи та пристрої систем безпеки й охорони : навч. посіб. / Г. І. Барило, М. В. Вісьтак, З. Ю. Готра та ін.; за ред. З. Ю. Готри. Чернівці : Рута, 2017. 216 с.
11. Сахно Є. Ю., Мороз Н. В., Пономаренко С. І. Використання теорії нечіткої логіки при управлінні проектами розвитку // Науковий вісник Полісся. 2021 № 3 (15). С. 119–126. [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-3\(15\)-119-126](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-3(15)-119-126)
12. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень : навч. посіб. / Т. А. Желдак, Л. С. Коряшкіна, С. А. Ус; за ред. С. А. Ус. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 387 с.
13. Підхід до класифікації об'єктів по зображеннях з IP-відеокамер з використанням теорії нечіткої логіки / С. О. Соболенко, О. Ф. Дубина, І. В. Пулеко, І. С. Григор'єв // Тези XV Міжнар. наук.-техн. конф. («Інформаційно-комп'ютерні технології», 28–29 березня 2025 р.). Житомир : ДУ "Житомирська політехніка", 2025. С. 248–249. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/248.pdf> (дата звернення: 18.09.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.10.2025.

REFERENCES

1. Patricia, M., Claudia, I., & Juan, R. et al. (2014). Edge-Detection Method for Image Processing Based on Generalized Type-2 Fuzzy Logic. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22 (6), 1515–1525. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2013.2297159>
2. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR-2016)*. Image Processing and Computer Vision. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
3. Amza, C. G., Nitoi, D. F., & Enciu, G. (2013). Automatic Image Processing for Welding

Inspection. In *Proc. of the 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Technologies (INMAT-13)*. Vouliagmeni, Athens, Greece, May 14–16, 2013. (pp. 153–158). ISSN 2227-4596.

4. Catalin Gheorghe Amza, Dumitru Titi Cicic. (2015). Industrial Image Processing Using Fuzzy-Logic. In *25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (DAAAM)*. *Procedia Engineering*, 100, 492–498. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.404>

5. Fedoniuk, T. P., Pyvovar, P. V., & Topolnytskyi, P. P. et al. (2025). Vykorystannia danykh dystantsiinoho zonduvannia dlia vyznachennia rivnia zabur'ianenosti kukurudzianykh poliv [Utilizing Remote Sensing Data to Ascertain Weed Infestation Levels in Maize Fields]. *Agriculture*, 15 (7), 711. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.1580.v1> [in Ukrainian].

6. Hanhalo, I. M., Lisovyi, D. O., & Zhebka, V. V. (2022). Rozpiznavannia ob'ektiv za dopomohoiu tekhnolohii komp'iuternoho zoru [Object Recognition Using Computer Vision Technologies]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii [Telecommunications and information technologies]*, 4 (77), 46–52. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2022.044652> [in Ukrainian].

7. Omelchenko, S. O. (2021). Vykorystannia komp'iuternoho zoru dlia rozpiznavannia obraziv [Using Computer Vision for Pattern Recognition]. In *Hlobalizatsiia naukovykh znan: mizhnarodna spivpratsia ta intehratsiia haluzei nauk : materialy II Mizhnar. student. nauk. konf. [Globalization of Scientific Knowledge: International Cooperation and Integration of Branches of Science: Materials of the II International Student. Scientific. Conf.]*. Vinnytsia, October 22, 2021. (pp. 108–110). Retrieved from <https://openarchive.nure.ua/handle/document/20567> [in Ukrainian].

8. Romancha, A. P., Borysov, D. V., & Podorozhniak, A. O. (2019). Doslidzhennia suchasnykh system kompiuternoho zoru [Research of modern computer vision systems]. In *Problemy informatyzatsii: tezy dopovidei 7th Mizhnar. nauk.-tekhnich. konf. [Problems of Informatization: Abstracts of the Reports of the 7th International Scientific and Technical Conf.]*. Cherkasy, November 13–15, 2019. P. 53 [in Ukrainian].

9. Vakaliuk, T., Dubyna, O. Nikitchuk, T., & Andreiev, O. (2023). Evaluation of the Effectiveness of the Integrated Security System as an Information System. In *Proceedings of the 11th International Conference ("Information Control Systems & Technologies")*. Odesa, September 21–23, 2023. *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 3513. (pp. 16–26). Retrieved from <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper02.pdf>

10. Barylo, H. I., Vistak, M. V., & Hotra, Z. Yu. et al. (2017). *Elektronni elementy ta prystroi system bezpeky y okhorony : navch. posib. [Electronic Elements and Devices of Security and Protection Systems: tutorial]*. Chernivtsi [in Ukrainian].

11. Sakhno, E. Y., Moroz, N. V., & Ponomarenko, S. I. (2021). Vykorystannia teorii nechitkoi lohiky pry upravlinni proiektamy rozvytku [Using the Theory of Fuzzy Logic in Managing Development Projects]. *Naukovi visnyk Polissia [Scientific Bulletin of Polissya]*, 3 (15), 119–126. [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-3\(15\)-119-126](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-3(15)-119-126) [in Ukrainian].

12. Zheldak, T. A., Koriashkina, L. S., & Us, S. A. (2020). Nechitki mnozhyny v systemakh upravlinnia ta pryiniattia rishen : navch. posib. [Fuzzy sets in management and decision-making systems: tutorial]. Dnipro [in Ukrainian].

13. Sobolenko, S. O., Dubyna, O. F., Puleko, I. V., & Hryhoriev, I. S. (2025). Pidkhyd do klasyfikatsii ob'ektiv po zobrazhenniakh z IR-videokamer z vykorystanniam teorii nechitkoi lohiky [Approach to Object Classification From Images with an IR Video Camera Using the Theory of Fuzzy Logic]. In *Tezy XV Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. («Informatsiino-komp'iuterni tekhnolohii»)* [Theses of the XV International Scientific and Technical Conference ("Information and Computer Technologies")]. Zhytomyr, March 28–29, 2025. (pp. 248–249). Retrieved from <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/248.pdf> [in Ukrainian].

O. F. Dubyna, S. O. Sobolenko, O. V. Andreiev, V. H. Parfeniuk, O. V. Heraymovych
DETERMINING THE REAL RESOLUTION OF DIGITAL IMAGES USING FUZZY LOGIC THEORY

The subject of the study in the work is the CCTV system of integrated object protection system. The approach to assessing the effectiveness of the object protection system, the importance of determining such a digital parameter as resolution. The requirements of the European standard EN 50 132-7 are analyzed to identify, recognize and identify objects on digital images. It is concluded that the designer and the customer must be determined by the purpose of installing each camera (people recognition, identification, detection, observation). When selecting a camera inspection zone, it is necessary to calculate at what parameters of the camera and lens in the area of inspection of the camera will be sufficient density of pixels to complete the task. The designer needs to find the golden middle between the greater pixel density, which allows you to see more details at a smaller viewing angle and a larger width of the camera inspection at a larger viewing angle, which allows to reduce the number of cameras in the project. In many cases, in order to ensure the recognition or identification of people, the designer will need to choose lenses with a large focal length or camera with greater resolution or change the place and height of the camera installation.

The analysis of the factors that influence the quality of the digital image has been carried out. The analysis showed that in order to determine the real resolution of the image and, accordingly, the likelihood of proper classification of objects of video surveillance systems, it is necessary to consider many factors that are in a certain contradiction with each other and this process is not subject to analytical modeling. The main such factors include: distinction, illumination during removal, range to the object, depth of sharpness.

The use of the requirement of the European standard EN 50 132-7 is possible only under the ideal conditions of removal and technical characteristics of video cameras. For video surveillance systems, tasks are characteristic of changing the conditions of shooting (time of day, year, different climatic and weather conditions, considerable distances at depth and width of the protected object). In this case, it is proposed to introduce an algorithm for determining the real resolution of the image of the IP video camera using the theory of fuzzy logic (Fuzzy logic) or fuzzy withdrawal. This algorithm estimates the degree of compliance with the conditions of removal to ideal conditions in which it is possible to apply the standard EN 50 132-7 to classify objects in images.

Keywords: video surveillance; camcorder; resolution; fuzzy logic; digital image.

І. А. Пількевич, С. І. Мірошніченко, А. О. Жуков, Р. В. Нетребко

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОЇ БІБЛІОТЕКИ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Згідно із Законом України від 05 вересня 2017 року № 2145-VIII "Про освіту" (ст. 75 "Наукове і методичне забезпечення освіти") одним із обов'язкових підходів до навчальної та наукової діяльності закладів вищої освіти є розроблення та впровадження інноваційних освітніх технологій. Крім того, зазначено, що для підрозділів у вишах повинен бути вільний доступ до вебсайтів, на яких розміщені навчальна література та методичні матеріали (електронні бібліотеки). Для підвищення ефективності інформаційного забезпечення користувачів, взаємодії окремих підрозділів використовується автоматизація всіх процесів закладу вищої освіти, розробляються не лише паперові, але й електронні видання (носії інформації).

З урахуванням викладеного актуальним є завдання автоматизувати роботу бібліотеки за різними аспектами діяльності з метою якісного інформаційного забезпечення освітнього процесу, наукової та науково-технічної діяльності вишу. У рамках створення автоматизованої системи управління закладу вищої освіти для підвищення оперативності пошуку необхідного навчального чи методичного матеріалу потрібно створювати електронні бібліотеки з ефективним пошуком за електронним каталогом видань різного виду спрямування та знань.

Отже, електронна бібліотека – це інформаційна система, яка зберігає документи в електронному вигляді та надає користувачам зручний доступ до них через комп'ютерні мережі (локальні або глобальні). Вона є цифровим аналогом традиційної бібліотеки, проте має розширені функції завдяки сучасним технологіям.

У статті описано роботу запропонованої моделі інформаційної системи електронної бібліотеки закладу вищої освіти, надано алгоритм її функціонування, а також визначено місце електронної бібліотеки в автоматизованій системі управління вишу. Детально розглянуто таблиці бази даних та наведено схему їхніх зв'язків, а також запропоновано приклад головної форми програми та інформаційну сторінку користувача.

Розроблена інформаційна система може бути реалізована за допомогою системи керування реляційними базами даних MySQL і скриптової мови програмування PHP (Personal Home Page). Практичне її використання буде безкоштовним.

Ключові слова: електронна бібліотека; база даних; система керування базою даних; модель інформаційної системи.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогодні відомі два напрямки, за якими може розвиватися корпоративність електронної бібліотечної системи.

З одного боку, це об'єднання зі світовими бібліотеками-аналогами та інформаційно-науковими центрами, а в майбутньому – і з музеями, архівами тощо. Таке об'єднання

цілком природне, тому що є схожі завдання щодо інформаційного обслуговування в галузі науки, освіти, культури тощо.

З іншого боку, є схожі подібні (цільові) групи користувачів – населення або його певні категорії: студенти, науковці, викладачі тощо. Між цими двома напрямками традиційно проводиться обмін ресурсами й послугами (наприклад, книгообмін тощо).

Серед основних сервісів електронно-бібліотечних корпоративних інформаційних систем (КІС) можна визначити такі:

зведені електронні каталоги (надають можливість шукати інформацію в багатьох бібліотеках через єдину точку доступу);

електронне замовлення видання й доставляння копії документа через Інтернет;

спільне створення та використання електронних ресурсів.

Усе це дозволяє підвищити якість обслуговування користувачів та оптимізувати роботу співробітників електронних бібліотек із оброблення вхідних видань.

Крім того, бібліотека часто є частиною деякої організації (наприклад, бібліотека закладу вищої освіти (ЗВО) – неосяжний структурний підрозділ, наукова бібліотека – підрозділ наукових організацій тощо). Вони пов'язані загальними фінансовими, інформаційними потоками тощо, що дозволяє якісно планувати їх роботу та постійно наповнювати бібліотечний фонд необхідними публікаціями, виданнями, пов'язуючи їх із напрямком діяльності того чи іншого спрямування (наукове або навчальне). Питання про створення сучасної КІС ЗВО дуже гостро стоїть на рівні держави [1].

У разі об'єднання підрозділів у рамках однієї організації в мережу автоматизованої системи управління (АСУ) ЗВО (див. рис. 1) природно постає питання про взаємний інформаційний обмін і скорочення дублювання робіт із введення й актуалізації даних [2, 3]. Електронна бібліотека пов'язана з іншими підрозділами ЗВО з таких основних напрямків:

інформація про особовий склад (зарахування й відрахування осіб, що навчаються, прийом і звільнення працівників тощо);

інформація про навчальну забезпеченість (навчальні плани, програми дисциплін, розподіл студентів за групами тощо).

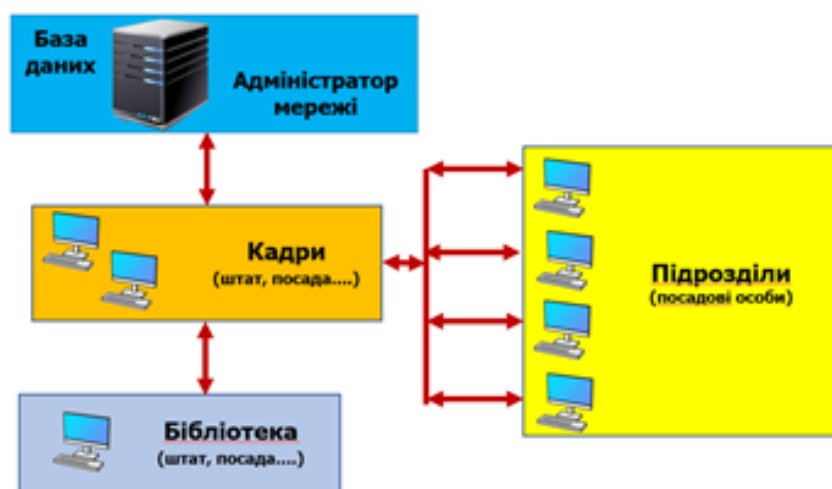


Рис. 1. Місце модуля “Електронна бібліотека” в структурі АСУ ЗВО

Основними перевагами електронної бібліотеки є:

- швидкий доступ до величезної кількості інформації;
- зручність використання (пошук, фільтри, навігація);
- підтримка віддаленого навчання й наукової діяльності;
- можливість копіювати, цитувати, анотувати матеріали;
- економія коштів на утримання фізичної бібліотеки.

У зв'язку з тим, що підрозділи ЗВО територіально розділені, не можна залишити без уваги й той факт, що електронна бібліотека повинна мати розподілену топологію, яка надає доступ до електронних видань із будь-якого місця. Сучасні технології дозволяють поєднувати всі ці складові в єдине ціле, причому незалежно від того, чи розташовані складові електронної бібліотеки в одному приміщенні.

Основним етапом є залучення в цю систему викладачів, аспірантів, осіб, що навчаються, тобто тих, хто виконує відбір і використання зовнішніх електронних ресурсів у рамках навчання навчальної дисципліни або за напрямком роботи. У цьому разі програма дисципліни або конспект лекцій має посилання на зовнішні ресурси, що розкривають зміст тієї або іншої теми, яка викладається. Так, в університетах США викладач зобов'язаний у процесі навчання надати студентам в електронному вигляді програму курсу з посиланнями на статті їх JSTOR (база даних статей) й інші ресурси. Причому звернення викладачів і студентів до інформаційного ресурсу (віра в його актуальність та надійність), на який даються посилання, настільки велике, що в програму вставляються тільки посилання, а повний текст документа не копіюється на персональний комп'ютер викладача або бібліотечний сервер ЗВО.

Зазначимо й основні недоліки електронної бібліотеки. Це залежність від електронних пристроїв та Інтернету, небезпека втрати даних через технічні збої, ризик порушення авторських прав і обмеження доступу. Крім цього, потрібно зважати на те, що не всі документи оцифровані.

Розглянемо архітектурні особливості побудови сучасних КІС і на підставі цього сформулюємо вимоги до електронно-бібліотечних комплексів.

Для інших предметних областей АСУ ЗВО, крім бібліотечної, загальноприйнятих стандартів як на національному, так і на міжнародному рівні немає. Створення корпоративної АСУ ЗВО припускає визначення такого стандарту на галузевому рівні. Після цього можлива взаємодія клієнтських програм із загальними джерелами даних у цій КІС. Можливе також створення робочих місць співробітників бібліотеки, які будуть взаємодіяти із серверною частиною, одержуючи необхідні дані з різних джерел про видання. За такої схеми обіг інформації може відбуватися зі всіма підрозділами вишу.

Метою статті є створення електронної бібліотечної системи ЗВО та інтеграція її в бібліотечну корпоративну систему, багатокритерійне завдання якої повинно вирішуватися поетапно (згідно з визначеними критеріями).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [4] описана роль електронної бібліотеки в побудові персональної бібліографічної моделі. Виявлено неоднорідність бібліографічних онлайн-ресурсів; запропоновано схему організації інтегрованого персонального надання інформації. У [5] розглянуто перехід публічних бібліотек

у цифровий формат під час воєнного стану. Описано виклики та адаптацію ресурсів у кризових умовах; зроблено акцент на важливості цифрових сервісів для доступності. Використання електронних бібліотечних сервісів для оцінювання науково-педагогічної діяльності описано в статті [6]. Базові основи побудови електронних бібліотек та аналіз їх функціональних можливостей розглянуто в [7]. Крім того, побудовано технологію оцінювання наукової активності через дані електронних бібліотек; показано практичне застосування сервісів. У [8] обґрунтовано подальші ключові вектори та визначено конкретні найпроблемніші питання цифрової трансформації бібліотек, розглянуто сучасні кроки із цифровізації в бібліотеках, особливості використання платформ, сервісів віртуального середовища та шерингових продуктів. Досліджено тенденції щодо подальших кроків у нарощенні темпів цифровізації.

Формулювання завдання дослідження. Основна вимога дослідження полягає в створенні таких програмних продуктів, доступ до яких був би, по-перше, розподілений за тематикою, по-друге, користувач мав би доступ до тієї інформації, яка йому призначена (за потреби можливе скачування необхідних матеріалів).

Одним зі способів отримання такої інформації є бази даних (БД). Інформація, яка зберігається в таблицях БД, може бути розподілена за різними видами діяльності та пов'язана між собою за ключовими полями (розподілені БД), можливим є створення таблиць, які відповідають за доступ користувачів до різних даних (паролі або електронні ключі).

Накопичення інформації за різними видами передбачає створення інформаційних комплексів, які будуть використовувати локальні сервери для зберігання матеріалів та доступу до них.

Одним із таких інформаційних комплексів є АСУ ЗВО, яка повинна сприяти роботі із забезпечення користувачів ЗВО методичною літературою з одної бази.

Для розроблення електронно-бібліотечної системи потрібно залучити додаткові засоби з метою забезпечення можливості роботи працівників бібліотеки в системі. Додаткові засоби можуть бути реалізовані по-різному за допомогою встановлення додаткового програмного забезпечення на робочих місцях співробітників бібліотеки. Наприклад, для визначених критеріїв це можуть бути спеціальні програми для завантаження літературних видань на визначені сервери або створення лінків (посилань) на зовнішні сервери (хмарні технології), тобто запозичення видань із зовнішніх джерел. Після цього комплектувальник джерел інформації повинен провести каталогізацію видання, яка передбачає віднесення його до визначеної категорії. Необхідно передбачити систему дублювання (збереження) каталогів інформації у визначеному місці (на зовнішніх носіях або додаткових зовнішніх накопичувачах інформації). Актуальність копій при цьому повинна підтримуватися за можливості автоматично (створення RAID-масивів).

Ще однією важливою роботою оператора системи є реєстрація її користувачів, відслідковування інших нештатних ситуацій (наприклад, збій роботи, питання незавантаження видань у систему або нестворення посилання на інформацію в програмі).

Отже, можна сказати, що робота зі створення інформаційного бібліотечного комплексу дуже кропітка та потребує поділу її на декілька частин.

Виклад основного матеріалу. Однією з частин введення в дію інформаційного бібліотечного комплексу є розроблення загального модуля електронної бібліотеки, який буде надавати доступ до інформаційних ресурсів системи.

Він повинен складатися з двох основних частин: роботи адміністратора та користувачів інформаційної системи (ІС).

Поділ спричинений різними завданнями, покладеними на користувачів системи, що й обумовлює функції доступу до неї. Завданням адміністратора системи є забезпечення її програмної роботи, наповнення електронними виданнями (можливо, через співробітників бібліотеки, викладачів тощо), створення посилань на повні видання завантажених файлів, забезпечення зберігання інформації на жорстких носіях інформації (своєчасне копіювання її), створення анотації видання, занесення її до відповідного розділу електронної бібліотеки, забезпечення доступу користувачів до визначених видань, захист інформації та даних користувачів, ведення облікових записів і бібліотечних формулярів, складання звітів щодо чисельності користувачів електронної бібліотеки, за потреби надання інформації про час відвідування та зацікавленість відповідними розділами, своєчасне замовлення заміни технічного обладнання тощо. Завданнями користувачів системи є реєстрація в бібліотеці, коректна робота в електронній системі тощо.

Побудувати модель ІС електронної бібліотеки можливо на базі використання БД MySQL [9, 10] та мови програмування PHP [11]. Для нашої моделі ІС електронної бібліотеки було розроблено такі основні таблиці (табл. 1).

Таблиця 1

Основні таблиці БД

Таблиця	Призначення
u85h4_abbook	Книги (основна інформація про них)
u85h4_abauthor	Автори
u85h4_abbookauth	Зв'язок між книгами та авторами (many-to-many)
u85h4_abeditor	Видавництва
u85h4_abcategories	Категорії книг
u85h4_abtag	Теги
u85h4_abbooktag	Зв'язок між книгами та тегами
u85h4_ablibrary	Філії / відділи бібліотек
u85h4_ablocations	Локації книг у бібліотеках
u85h4_ablend	Видача книг користувачам
u85h4_abrating	Рейтинги видань

У зв'язку з тим, що запропонована БД є розподіленою, то виникла необхідність з'єднання створених таблиць за ключовими полями. Типовими зв'язками в моделі ІС є:

- **Книга ↔ Автор:** many-to-many (через u85h4_abbookauth);
- **Книга ↔ Тег:** many-to-many (через u85h4_abbooktag);
- **Книга ↔ Категорія:** one-to-many;

- Книга ↔ Видавництво / Локація / Бібліотека: many-to-one;
- Книга ↔ Рейтинг / Видача: one-to-many.

Схему зв'язків між таблицями за ключовими полями (так звану схему даних) показано на рис. 2, а візуальну спрощену схему наведено на рис. 3.

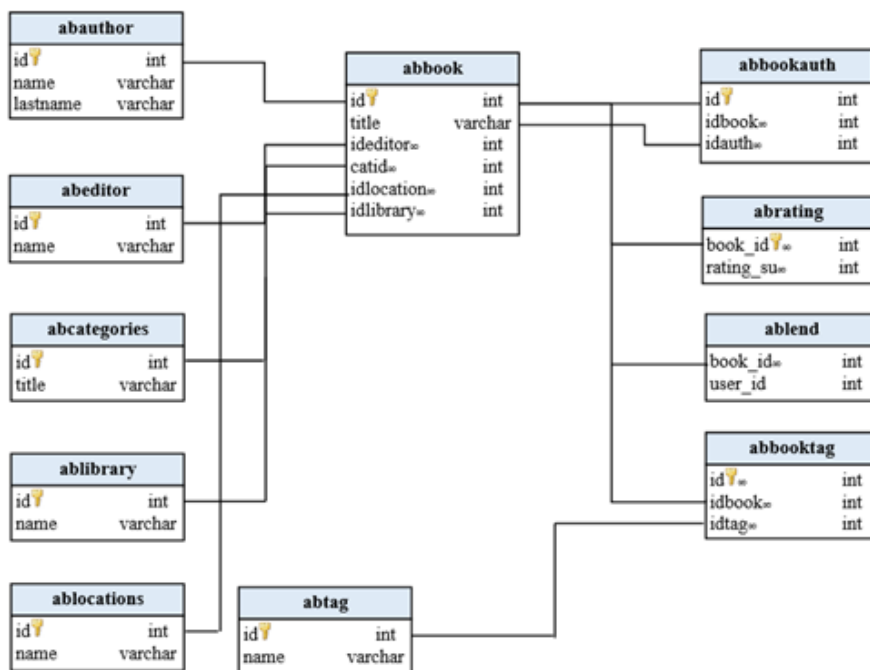


Рис. 2. Схема даних БД

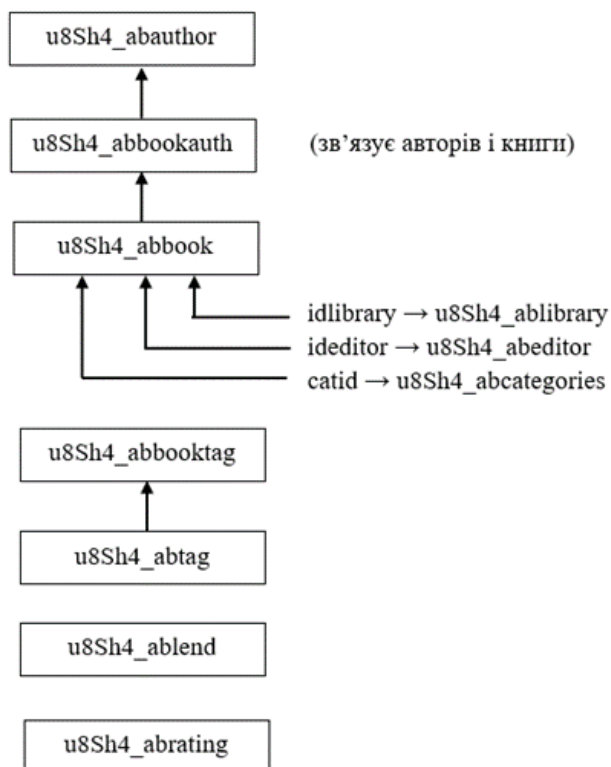
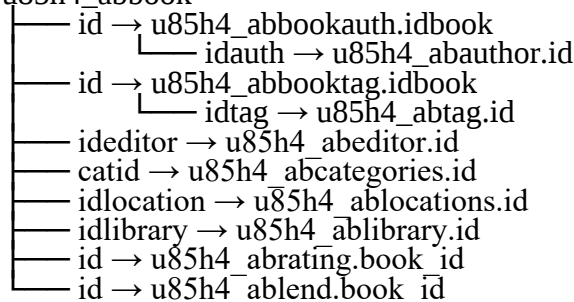


Рис. 3. Візуальна спрощена схема даних БД

Схема зв'язків між таблицями

u85h4_abbook



Головну форму запропонованої моделі ІС зображено на рис. 4, у ній розміщено модуль авторизації користувачів (рис. 5).

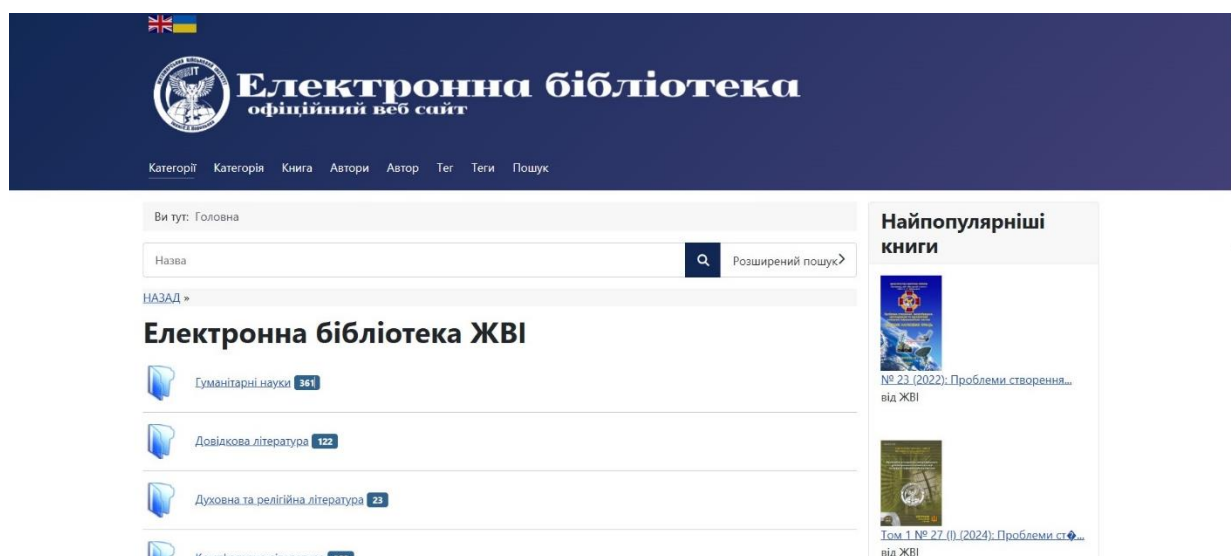


Рис. 4. Головна форма ІС

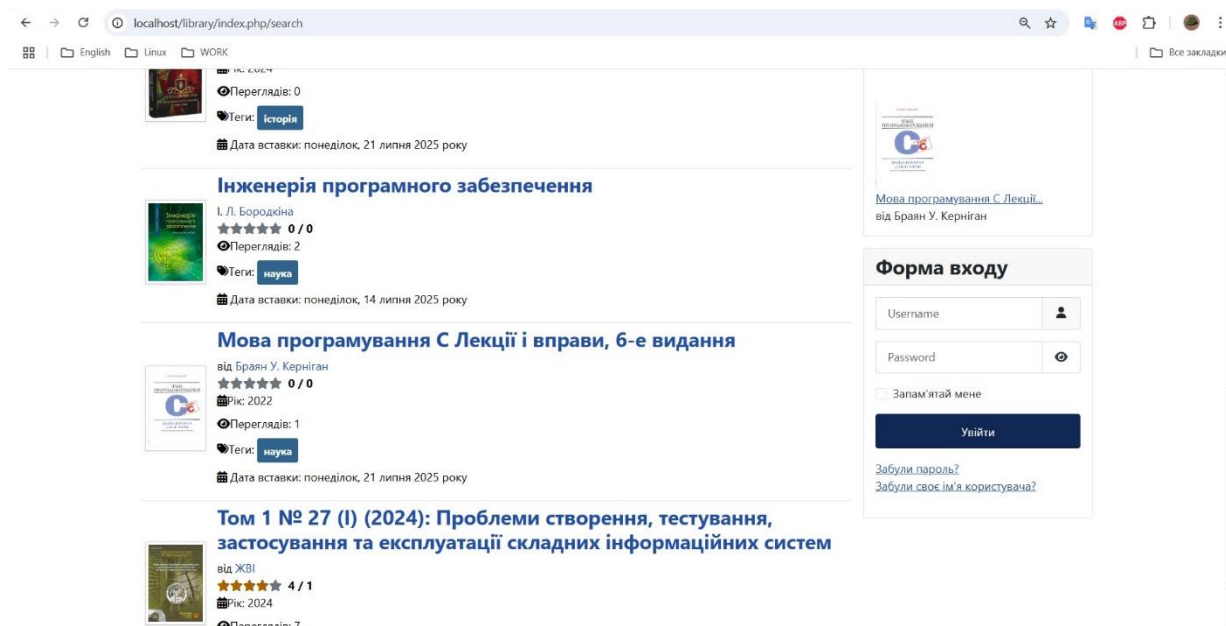


Рис. 5. Модуль авторизації користувачів

Як бачимо, робота з ІС може здійснюватися або адміністратором мережі, або загальним користувачем. У такий спосіб реалізуються адміністративні функції щодо наповнення БД літературою, реєстрації нових користувачів, архівування та копіювання матеріалів, аналізу роботи користувачів системи тощо.

На рис 6 наведено форму пошуку необхідної інформації в моделі ІС.

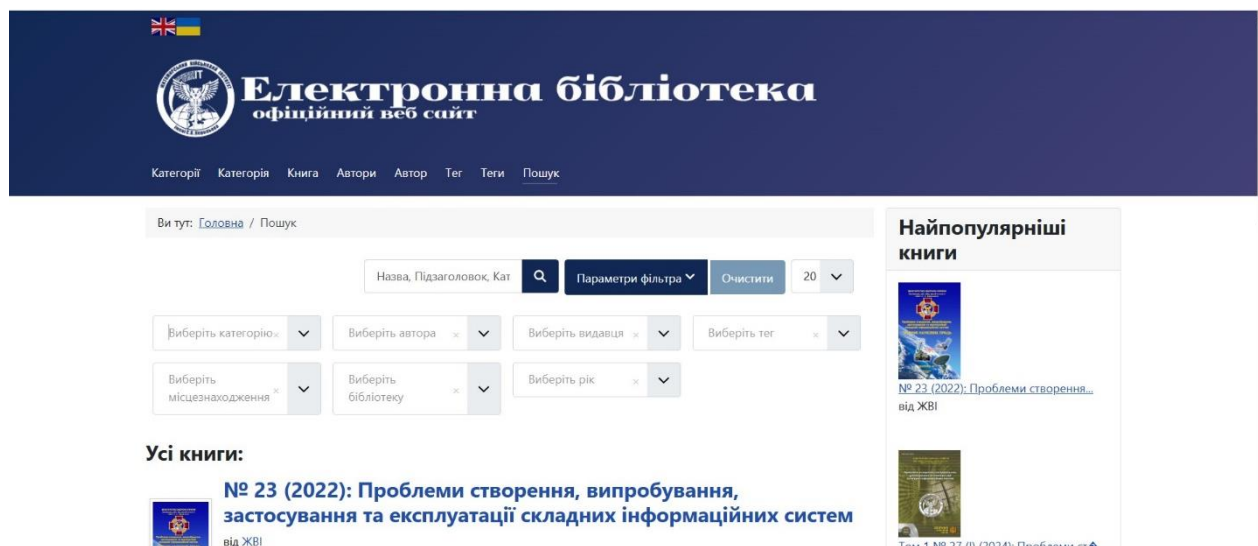


Рис. 6. Запропонована форма пошуку інформації в моделі ІС

Наведемо приклади сформованих запитів у розробленій моделі ІС електронної бібліотеки ЗВО.

1. Отримання всіх публікацій визначених авторів

```
sql
SELECT b.title, a.lastname, a.name
FROM u85h4_abbook b
JOIN u85h4_abbookauth ba ON b.id = ba.idbook
JOIN u85h4_abauthor a ON ba.idauth = a.id
```

2. Отримання книг визначеної категорії

```
sql
SELECT b.title
FROM u85h4_abbook b
WHERE b.catid = (SELECT id FROM u85h4_abcategories WHERE title = 'Комп'ютерна література')
```

3. Отримання видань за назвою

```
sql
SELECT b.title
FROM u85h4_abbook b
JOIN u85h4_abbooktag bt ON b.id = bt.idbook
JOIN u85h4_abtag t ON bt.idtag = t.id
WHERE t.name = 'science'
```

Висновки. Одним із головних питань розвитку освіти є цифрова трансформація бібліотечної справи. Електронні бібліотеки стали ключовим ресурсом у науковій діяльності, оскільки вони дозволяють швидко отримувати доступ до рецензованих статей, монографій, дисертацій, звітів. В умовах дистанційного навчання вони забезпечують студентів та викладачів повноцінними освітніми ресурсами. Особливої актуальності електронні бібліотеки набули в умовах воєнного стану в Україні, коли традиційний доступ до бібліотек ускладнений або неможливий.

На сучасному етапі розвитку електронна бібліотека – це не просто цифровий аналог традиційної бібліотеки, а складна ІС, що відіграє ключову роль у забезпеченні вільного доступу до знань. У сучасному інформаційному суспільстві вона є важливим інструментом наукового обміну, освітньої взаємодії та збереження культурної спадщини.

Проведене локальне тестування ІС електронної бібліотеки ЗВО дозволяє зробити висновок, що система працездатна та функціонує правильно.

Подальший розвиток електронних бібліотек в Україні вимагає комплексного підходу, поєднання технічних, правових і освітніх зусиль. Зазначимо основні перспективні напрямки розвитку ІС електронних бібліотек.

1. Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання, яке визначає автоматизацію каталогізації (ШІ зможе аналізувати тексти, визначати їх тематику та, наприклад, писати анотації); організацію чатботів (користувач зможе запитувати й отримувати відповіді природною мовою); автоматизацію аналітичних досліджень (надання звітів, наприклад, які теми є найбільш популярними, які дослідження найбільше цитують тощо).

2. Персоналізація надає допомогу користувачу в підборі книг, наукових статей, які є актуальними для його розвитку.

3. Аналізування текстів визначає використання ШІ для автоматичної класифікації текстів, створення резюме великих наукових робіт, тобто допомагає автоматично визначати підбір необхідної літератури для відпрацювання. Організація глибокого пошуку в документах.

4. Розширення доступу до нових наукових публікацій та досліджень, які є відкритими для публікування, інтегрування з навчальними платформами (Moodle, Coursera тощо).

5. Упровадження нових технологій, яке визначає створення віртуальних читальних залів, бібліотек, які вміщують велику кількість документів, перетворення друкованих видань у новітні формати з високою якістю читання. Використання хмарних обчислень для надійного зберігання документів.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Чумак Є. Електронні бібліотеки як вагомий складник національного інформаційного простору України // Вісник Книжкової палати. Розділ – Бібліотечна справа. 2023. № 5. С. 16–23. [https://doi.org/10.36273/2076-9555.2023.5\(322\).16-23](https://doi.org/10.36273/2076-9555.2023.5(322).16-23)
2. Пількевич І. А., Мірошніченко С. І. Модель інформаційної системи електронного документообігу територіально розподілених підрозділів підприємства // Проблеми

створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2023. Вип. 25 (І). С. 19–30. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.02>

3. Пількевич І. А., Мірошніченко С. І., Заєць Ю. О., Лобода В. В. Автоматизована інформаційна система “Кадри” // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць, Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (І). С. 20–30. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.02>

4. Стронська Н. Т. Електронна бібліотека як структурна частина інформаційної моделі “Українська бібліографія в особах”: постановка проблеми // Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія. 2017. № 4. С. 37–43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bdi_2017_4_6 (дата звернення: 22.09.2025).

5. Чумак Є. Трансформація інформаційних ресурсів публічних бібліотек України в сучасних умовах // Український журнал з бібліотекознавства та інформаційних наук. 2022. Вип. 10. С. 36–48. <https://doi.org/10.31866/2616-7654.10.2022.269445>

6. Іванова С. М., Новицька Т. Л. Методика використання наукових електронних бібліотек для розвитку інформаційно-дослідницької компетентності наукових і науково-педагогічних працівників // Наукові записки. Серія: Педагогічні науки. Кропивницький, 2019. Вип. 183. С. 89–95. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2019-1-183-89-95>

7. Електронні бібліотечні інформаційні системи наукових і навчальних закладів : монографія / О. М. Спірін, С. М. Іванова, О. В. Новицький та ін. ; наук. ред. В. Ю. Бикова, О. М. Спірін. Київ : Педагогічна думка, 2012. 176 с. ISBN 978-966-644-239-3. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/19783544.pdf> (дата звернення: 22.09.2025).

8. Івашкевич О. Цифрова трансформація бібліотек України: сьогодення та перспективи // Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія : наук. журн. 2021. № 2. С. 50–56. <https://doi.org/10.32461/2409-9805.2.2021.238782>

9. Андреєв А. С. Перспективи використання PHP та MySQL в проектах // Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2023) : collection of Students' Scientific Paper : Electronic edition. Kharkiv : Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics, 2023. Part 1. Р. 66–69. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/22830> (дата звернення: 22.10.2025).

10. Blum R. PHP, MySQL, & JavaScript All-in-One For Dummies. New York, USA : John Wiley and Sons Ltd, 2025. 768 p. ISBN 978-139-434-209-9.

11. Васильєв О. Програмування мовою PHP : навч. посіб. Київ : Видавництво Ліра-К, 2022. 368 с. ISBN 978-617-520-322-4.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2025.

REFERENCES

1. Chumak, Ye. (2023). Elektronni biblioteky yak vahomyi skladnyk natsionalnoho informatsiinoho prostoru Ukrainy [Electronic Libraries as a Significant Component of the National Information Space of Ukraine]. *Visnyk Knyzhkovoi palaty. Rozdil – Bibliotekna sprava [Bulletin of the Book Chamber. Section – Library Affairs]*, 5, 16–23. [https://doi.org/10.36273/2076-9555.2023.5\(322\).16-23](https://doi.org/10.36273/2076-9555.2023.5(322).16-23)

2. Pilkevych, I. A., & Miroshnichenko, S. I. (2023). Model informatsiinoi systemy elektronnoho dokumentoobihu terytorialno rozpodilenykh pidrozdiliv pidpriemstva [Model of the Information System of Electronic Document Management of the Territorially Distributed Subdivisions of the Enterprise] // *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), 19–30. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.02> Zhytomyr [in Ukrainian].
3. Pilkevych, I. A., Miroshnichenko, S. I., Zaiets, Yu. O., & Loboda, V. V. (2024). Avtomatyzovana informatsiina systema “Kadry” [Automated Information System “Kadry”]. // *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats* [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute, 27 (I), 20–30. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.02> Zhytomyr [in Ukrainian].
4. Stronska, N. T. (2017). Elektronna biblioteka yak strukturna chastyna informatsiinoi modeli “Ukrainska bibliohrafiia v osobakh”: postanovka problem [Electronic library as a structural part of the information model “Ukrainian bibliography in persons”: statement of the problem]. *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia* [Library science. Document science. Informology], 4, 37–43. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/bdi_2017_4_6 [in Ukrainian].
5. Chumak, Ye. (2022). Transformatsiia informatsiinykh resursiv publichnykh bibliotek Ukrainy v suchasnykh umovakh [Transformation of Information Resources of Public Libraries of Ukraine in Modern Conditions]. *Ukrainskyi zhurnal z bibliotekoznavstva ta informatsiinykh nauk* [Ukrainian Journal of Library Science and Information Sciences], 10, 36–48. <https://doi.org/10.31866/2616-7654.10.2022.269445> [in Ukrainian].
6. Ivanova, S. M., & Novytska, T. L. (2019). Metodyka vykorystannia naukovykh elektronnykh bibliotek dlia rozvytku informatsiino-doslidnytskoi kompetentnosti naukovykh i naukovopedahohichnykh pratsivnykiv [Methodology of Using Scientific Electronic Libraries for the Development of Information and Research Competence of Scientific and Scientific-Pedagogical Workers]. *Naukovi zapysky. Serii: Pedahohichni nauky* [Scientific notes. Series: Pedagogical sciences], 183, 89–95. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2019-1-183-89-95> Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
7. Spirin, O. M., Ivanova, S. M., & Novytskyi, O. V. et al. (2012). *Elektronni bibliotechni informatsiini systemy naukovykh i navchalnykh zakladiv: monohrafiia* [Electronic Library Information Systems of Scientific and Educational Institutions: Monograph]. ISBN 978-966-644-239-3. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/19783544.pdf> Kyiv [in Ukrainian].
8. Ivashkevych, O. (2021). Tsyfrova transformatsiia bibliotek Ukrainy: sohodennia ta perspektyvy [Digital Transformation of Ukrainian Libraries: Present and Prospects]. *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia: nauk. zhurn.* [Library Science. Document Science. Informology: Scientific Journal], 2, 50–56. <https://doi.org/10.32461/2409-9805.2.2021.238782> [in Ukrainian].
9. Andreiev, A. S. (2023). Perspektyvy vykorystannia PHP ta MySQL v proektakh [Prospects for Using PHP and MySQL in Projects]. In *Automation and Development of Electronic Devices*

(ADED2023): collection of Students Scientific Paper: Electronic ed. Part 1. (pp. 66–69). Retrieved from <https://openarchive.nure.ua/handle/document/22830> Kharkiv [in Ukrainian].

10. Blum, R. (2025). *PHP, MySQL, & JavaScript All-in-One for Dummies*. New York, USA: John Wiley and Sons Ltd. ISBN 978-139-434-209-9.

11. Vasyliiev, O. (2022). *Prohramuvannia movoiu PHP: navch. posib. [Programming in PHP: textbook]*. Kyiv. ISBN 978-617-520-322-4. [in Ukrainian].

I. A. Pilkevych, S. I. Miroshnichenko, A. O. Zhukov, R. V. Netrebko

MODEL OF THE INFORMATION SYSTEM OF THE ELECTRONIC LIBRARY OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

According to the Law of Ukraine dated September 5, 2017, No. 2145-VIII “On Education” (Article 75 “Scientific and Methodological Support of Education”), one of the mandatory approaches to educational and scientific activities of higher education institutions is the development and implementation of innovative educational technologies. In addition, the Law states that departments of higher education institutions have free access to websites where textbooks and methodological materials (electronic libraries) are posted.

To improve the efficiency of information support for users and interaction between individual departments, all processes of higher education institutions are being automated, and not only paper-based but also electronic media are being developed.

Therefore, it is important to automate the work of the library in various aspects of its activities in order to provide high-quality information support for the educational process and scientific as well as scientific and technical activities of the institution. As part of the creation of an automated management system for higher education institutions, and to improve the efficiency of searching for the necessary methodological materials, it is necessary to create electronic libraries with effective search capabilities using an electronic catalog of publications of various types and fields of knowledge.

Thus, an electronic library is an information system that stores documents in electronic form and provides users with convenient access to them via computer networks (local or global). It is a digital analogue of a traditional library but has expanded functions thanks to modern technologies.

The article describes the operation of the proposed model of an electronic library information system for higher education institutions, provides an algorithm for its operation, and defines the place of the electronic library in an automated higher education management system. The database tables are examined in detail, a diagram of the relationships between these tables is provided, and an example of the main program form and the information page of a specific user is proposed.

The developed information system can be implemented using the MySQL relational database management system and the PHP (Personal Home Page) scripting language. Its practical use will be free of charge.

Keywords: *electronic library; database; database management system; information system model.*

Д. А. Іщенко, В. В. Стрінада, Л. М. Марищук

ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ТЕРМІНОЛОГІЧНОЇ ТА КЛАСИФІКАЦІЙНОЇ БАЗ СИСТЕМИ ЗАГАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ВИСОКОЇ ДИНАМІКИ РОЗВИТКУ

Аналіз тенденцій розвитку техніки радіоелектронної боротьби та безпілотних систем засвідчує їх ключову роль у досягненні технологічної переваги над противником. Висока динаміка розвитку цих видів військової техніки зумовлює актуальність проблеми формування системи загальних технічних вимог, необхідних для набуття нових спроможностей в умовах ресурсних обмежень.

Підвищення ефективності розвитку військової техніки високої динаміки розвитку в межах життєвого циклу можливе завдяки стандартизації вимог, що забезпечує: масштабування виробів (серійне та масове виробництво); оптимізацію процесів випробувань; підвищення ефективності логістичної підтримки. Реалізація цього підходу потребує впровадження системи загальних технічних вимог для відповідних груп виробів. На сьогодні в Україні розробляються та впроваджуються національні нормативні документи й військові стандарти, які становлять основу для формування таких систем. Водночас значущим аспектом проблеми розвитку військової техніки з високою динамікою розвитку є недосконалість термінологічної та класифікаційної бази, зумовлена швидкими темпами розвитку й мінливістю вказаних зразків.

У статті розглянуто науково-методологічні засади формування термінологічної та класифікаційної бази для створення системи загальних технічних вимог до військової техніки високої динаміки розвитку. Актуальність дослідження визначається потребами: уніфікації підходів до технічного нормування вимог; забезпечення сумісності з міжнародними стандартами (зокрема STANAG); підвищення ефективності розроблення, експлуатації та модернізації відповідних засобів.

Науковий апарат дослідження включає: понятійно-термінологічну систему; принципи класифікації; структурно-функціональні ознаки військової техніки високої динаміки розвитку; методологію побудови системи загальних технічних вимог.

Термінологічна база забезпечує єдність трактування ключових понять у науковій діяльності, технічних завданнях і стандартах, а класифікаційна дозволяє систематизувати військову техніку високої динаміки розвитку за такими ознаками: призначення, базування, конструктивні особливості, рівень автономності, тактико-технічні характеристики тощо.

Практичне значення дослідження полягає у створенні підґрунтя для стандартизації вимог до військової техніки з високою динамікою розвитку, гармонізації національних нормативних документів із міжнародними вимогами, а також у забезпеченні методологічної підтримки для фахівців, експертів і виробників. Запропонований підхід

сприяє підвищенню системності, прозорості та керованості процесів технічного регулювання в оборонному секторі.

Ключові слова: *термінологія; класифікація; військова техніка високої динаміки розвитку; загальні технічні вимоги; науковий апарат.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Досвід відбиття широкомасштабної агресії РФ показав: ресурсне домінування противника робить технологічну перевагу єдиним шляхом досягнення балансу в застосуванні військ (сил). Найважливішими засобами її забезпечення є безпілотні системи (БпС) та техніка радіоелектронної боротьби (РЕБ), здатні компенсувати дисбаланс у людських і матеріальних ресурсах.

Спільною ознакою БпС та техніки РЕБ є їх висока динаміка розвитку (ВДР), що відображається в скорочених життєвих циклах (ЖЦ) (дослідження та розроблення (Research and Development) – від 6 до 9 міс.; виробництво – до 12 міс.; модернізація – кожні 4–6 міс.) [1]. Технологічна доцільність підтверджується високою часткою нових рішень (30–40 % вузлів щороку), інтеграцією штучного інтелекту, цифрових двійників і модульних архітектур.

В умовах воєнного стану, коли час на прийняття рішень обмежений, розвиток військової техніки (ВТ) ВДР набуває критичного значення для збереження боєздатності та управління військами [2].

ВДР БпС та техніки РЕБ чинить постійний тиск на систему розроблення й виробництва, а відсутність уніфікованої термінології та класифікації загрожує ефективності масштабування й сумісності. Крім того, надмірна номенклатура виробів без загальних вимог знижує оперативність та економічну ефективність ЖЦ.

ВТ ВДР є матеріальною основою бойових спроможностей, а правильне формування вимог до неї – ключове завдання органів військового управління [3]. Практичний досвід засвідчив зростання обсягу інформаційної роботи, складність узгодження даних і дій між численними учасниками ЖЦ виробів ВТ ВДР [1].

Розв'язання цієї проблеми можливе через розроблення системи загальних технічних вимог (СЗТВ), що забезпечить визначення характеристик для всіх зразків ВТ певного виду. Водночас відсутність сталої термінологічної та класифікаційної баз ускладнює уніфікацію, сумісність і призводить до збільшення номенклатури виробів БпС та РЕБ.

Отже, розроблення методології дослідження з формування СЗТВ до ВТ ВДР на основі чіткої термінології та класифікації є актуальним науково-практичним завданням, яке потребує цілісного методичного апарату, що поєднує теоретичні, нормативні та прикладні інструменти [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав наявність значної кількості робіт, присвячених цій темі. Потреба класифікації систем, комплексів і зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), зокрема техніки РЕБ та БпС, підтверджується нормативними документами України [6], які визначають ознаки класифікації, терміни та просторові характеристики. Водночас спостерігається неоднозначність у формулюваннях і відмінності від чинних класифікацій.

Аналіз військових стандартів (ВСТ) показав наявність 9 чинних документів за функціональною ознакою «002 – Кодифікація» [7], що формують нормативне підґрунтя

класифікації, наприклад, РЕБ. У [8] визначено лише наземну техніку РЕБ із кодом ВК 001-2000 – В5 00 0000У, що відповідає класам II (НАТО) та VII (США), але не охоплює інших середовищ (повітряного, морського, космічного).

Нормативний документ [9] узгоджено з ACodP-2 НАТО, проте техніка РЕБ у ньому представлена лише узагальненою групою зі «швидкодіючою апаратурою». Код 5865 («Техніка РЕБ та швидкодіюча апаратура») дозволяє здійснити кодифікацію, але не розкриває змісту. Зазначене вказує на необхідність деталізації класифікації для розвитку спроможностей РЕБ [2].

Стандарти [10–11] уточнюють поняття засоби РЕБ і поділяють їх на системи, комплекси та зразки, що узгоджується з [12]. Класифікація здійснюється за місцем розміщення (наземні, авіаційні, корабельні) та складовими спроможностей.

Аналіз [13] показав практичні класифікації за дальністю дії: стратегічно-оперативні, оперативно-тактичні (до 500 км), тактичні (до 50 км), ближньої дії («окопні» – до 10 км). Хоча терміни спрощені, але вони відображають бойовий досвід РЕБ із БпС противника.

Нормативна база щодо БпС [14] визначає класифікаційні ознаки безпілотних авіаційних комплексів за призначенням, просторовими характеристиками, рухливістю та масогабаритними параметрами.

Це підтверджує потребу в уніфікованій системі класифікації для РЕБ і БпС як ключових засобів набуття спроможностей Сил оборони України.

Запропоновані в [15] результати ідентифікації та класифікації засобів РЕБ рф з уточненням ознак класифікування підтверджуються матеріалами [16]. Водночас ця класифікація потребує корекції: частину ознак визначено лише за сферою застосування (наземні, авіаційні).

У роботі [17] запропоновано елементи наукового апарату, що частково реалізовані в [10, 11]. Проте ці документи належать до адміністративної стандартизації й потребують уточнення для матеріальної галузі, де формується комплексна СЗТВ.

Важливим джерелом є [18], що містить класифікаційні ознаки засобів РЕБ Збройних Сил України, країн НАТО та рф. Вони можуть бути використані для прикладів у ході розроблення науково обґрунтованих підходів, але мають ілюстративний характер та окремі неоднозначності.

Іноземні джерела [19–20] визначають підходи партнерів до класифікації предметів постачання, вони гармонізовані з [9].

Отже, аналіз літератури показав, що відомі дослідження з класифікації РЕБ і БпС є фрагментарними та досі не завершеними, тому потрібне нормативне встановлення термінологічної та класифікаційної баз СЗТВ для ВТ ВДР [4]. Це може бути реалізовано через розроблення спеціалізованих ВСТ, наприклад, для техніки РЕБ та БпС.

Обов'язковою передумовою ефективного формування ґрунтовних загальних технічних вимог (ЗТВ) до різноманіття засобів ВТ ВДР є загальноприйнята для суб'єктів усіх стадій ЖЦ таких виробів військового призначення [21] класифікація з відповідним термінологічним забезпеченням. Науковий апарат необхідних термінологічної та класифікаційної баз повинен забезпечити їх розроблення чіткою, логічно структурованою та методично обґрунтованою основою, яка дозволить отримати науково достовірні результати та зробити обґрунтовані висновки щодо подальшого формування СЗТВ.

За результатами аналізу [22–23] можна визначити, що в цій роботі науковий апарат – це основа, яка визначає спрямованість, логіку й умови підготовки та проведення дослідження з приводу термінів і визначень понять щодо засобів (зразків, комплексів, систем) ВТ ВДР, вимог до них та їх класифікування, а також варіантів прийнятної класифікації, що стане базою розділення та/або об'єднання різноманіття засобів такої техніки на певні групи (підгрупи, класи, підкласи, типи тощо), які близькі за ознаками (характеристиками) настільки, що до групи можливо, доцільно та потрібно розробити СЗТВ.

Формулювання завдання дослідження. За викладених умов необхідність розроблення засад уніфікованого наукового апарату досліджень щодо термінологічної та класифікаційної баз формування СЗТВ до ВТ ВДР, яка підтримується систематизованою термінологічною базою щодо класифікування засобів ВТ ВДР, узгоджено з нормативно встановленими положеннями комплексної СЗТВ (КСЗТВ) до ОВТ за такими складовими: актуальність дослідження; суперечність; проблема; об'єкт; предмет; мета, гіпотеза, завдання, методи, наукова новизна та практична значущість дослідження.

Виклад основного матеріалу. У дослідженнях щодо розроблення засад наукового апарату формування СЗТВ до БпС та техніки РЕБ наведено методологію відносно СЗТВ до техніки РЕБ. Розроблення уніфікованого наукового апарату дозволяє подати інформацію на прикладі одного виду ВТ ВДР – техніки РЕБ. Інформацію ж про БпС не зазначено через подібність підходів, за винятком незначних особливостей, які суттєво не вплинули на їх зміст.

1. Актуальність дослідження формування СЗТВ до техніки РЕБ зумовлена:

1) ВДР цього виду техніки у всіх ланках збройної боротьби (стратегічної, оперативної, тактичної, ближньої дії);

2) появою нових засобів (наприклад, комплексів РЕБ із БпЛА), які відрізняються за: а) функціональним призначенням (зокрема електронної підтримки (ЕП) РЕБ); б) способами (методами) радіоелектронного впливу на радіоелектронні засоби об'єкти противника [11]; в) дезорганізацією дій (управління) противника (наприклад, спуфінг). Крім того, такі зразки ВТ модернізуються завдяки елементам передових сучасних технологій (штучного інтелекту, кібервпливу тощо) у разі необхідності набуття нових спроможностей військ (сил) із РЕБ для інтеграції їх у всі види дій (операцій) в умовах ресурсних (людських, матеріальних, за часом) обмежень, що об'єктивно обумовлюють потребу підвищення ефективності реалізації всіх стадій ЖЦ, зокрема за рахунок їх уніфікації, шляхом формування та впровадження СЗТВ до сукупностей вказаних виробів ОВТ.

Але на теперішній час такі сукупності визначені розпорядчими документами лише частково (засоби РЕБ тактичного рівня, засоби РЕБ ближньої дії тощо [6]), а класифікація та потрібна термінологія наведені фрагментарно, що ускладнює їх розроблення, випробування, впровадження та відповідність ЗТВ до ОВТ, визначеним у [4] та [5].

Отже, дослідження за напрямком вирішення проблеми вдосконалення класифікації техніки РЕБ на базі термінів і дефініцій щодо її різновидів (видів) та класифікування, а також визначення нормативно встановлених ЗТВ до неї [4] є актуальним науково-практичним завданням, що потребує цілісного науково-методичного апарату, який поєднує теоретичні, нормативні та прикладні інструменти.

2. Суперечність. Відомі системи класифікації містять розбіжності через швидкий розвиток технологій та різні підходи держав. Основні проблеми щодо:

класифікації: різні ознаки (функціональне призначення, мобільність, рівень застосування), плутанина понять;

термінології: відсутність єдиного понятійного апарату, використання застарілих термінів (глушіння, придушення), різні трактування (ЕП РЕБ, електронна атака НАТО, протидія рф);

технічних вимог: невизначеність стандартів ЗТВ призводить до різних уявлень замовників, розробників і виробників.

3. Проблема дослідження. Відсутність уніфікованої класифікації та термінології ускладнює ефективність засобів РЕБ на стадіях ЖЦ, що, у свою чергу, впливає на набуття спроможностей оборони, наприклад, групи Р-7.1 «Радіоелектронна боротьба» [2].

4. Об'єктом дослідження є КСЗТВ до ОВТ, зокрема до техніки РЕБ, як складова системи стандартизації у сфері оборони.

5. Предметом дослідження є терміни, визначення та класифікаційні ознаки техніки РЕБ у структурі КСЗТВ, методи їх уніфікації та гармонізації з міжнародними стандартами (STANAG).

6. Метою дослідження є розроблення науково обґрунтованої термінологічної та класифікаційної баз СЗТВ до техніки РЕБ для ефективного формування вимог до різновидів засобів.

7. Завданнями дослідження визначено: аналіз підходів України та країн НАТО до розв'язання вказаної проблеми; систематизація термінів і визначень; дослідження нормативних СЗТВ [4]; розроблення вдосконаленої класифікації з урахуванням вимог STANAG; формування рекомендацій щодо впровадження нормативної документації та практики її застосування.

8. Гіпотезами дослідження є уніфікована класифікація засобів РЕБ та вдосконалена термінологічна система, що забезпечать скорочення часу прийняття на озброєння, сумісність із партнерами та зменшення витрат.

9. Методами дослідження є як теоретичні (аналіз, синтез, індукція, порівняння, історичний, гіпотетичний), так й емпіричні (спостереження, узагальнення досвіду). Використано аналіз нормативних документів [4, 5, 7, 9, 11], порівняльний аналіз національних і міжнародних класифікацій, системний аналіз, експертні опитування, методи термінологічної стандартизації.

10. Наукова новизна. Уперше запропоновано науково обґрунтовану уніфіковану класифікацію ВТ ВДР, яка з використанням удосконаленого переліку термінів, дефініцій щодо засобів (техніки) РЕБ і вимог до них дасть можливість сформулювати СЗТВ її різновидів.

11. Практичним значенням є розроблення класифікації та вдосконаленого переліку термінів і визначень щодо засобів (техніки) РЕБ та вимог до них: у ВСТ «Комплексна система загальних технічних вимог до озброєння та військової техніки. Техніка радіоелектронної боротьби. Терміни та визначення понять, класифікація»; у нормативних документах і практичній діяльності органів військового управління – замовників,

наукових установ – розробників проєктів оперативно-стратегічних (оперативно-тактичних) вимог до систем (комплексів, зразків техніки) РЕБ і виробників цих засобів у ході розроблення та випробування нових зразків, комплексів, систем РЕБ; в освітньому процесі (у навчальних програмах, планах, дидактичних матеріалах) підготовки фахівців РЕБ.

На наш погляд, дослідження на тему «Формування термінологічної та класифікаційної баз системи загальних технічних вимог до військової техніки високої динаміки розвитку» може мати таку структуру: вступ, 3 розділи та висновки до них, загальні висновки, розроблений проєкт ВСТ, список використаних джерел, додатки тощо. Розглянемо детальніше можливі 3 розділи запропонованого підходу.

Розділ 1. Аналіз достатності термінологічного забезпечення та чинних варіантів класифікації, що стосується техніки РЕБ, для формування системи загальних технічних вимог до таких засобів

1.1. Аналіз нормативно встановленої термінології щодо загальних технічних вимог до техніки РЕБ та її класифікування дозволив визначити потребу вдосконалення термінологічного забезпечення СЗТВ до техніки РЕБ. Під термінологічним забезпеченням СЗТВ РЕБ розуміємо діяльність органів військового управління та наукових установ (організацій), що пов'язана з розвитком спроможностей РЕБ, спрямована на створення, упорядкування та підтримання в актуальному стані системи єдиних точних термінів та відповідних до них однозначних понять для використання в стандартах КСЗТВ щодо СЗТВ РЕБ, проєктах оперативно-стратегічних й оперативно-тактичних вимог до систем і комплексів (зразків) техніки РЕБ, відповідних інших документах, навчальних матеріалах, наукових публікаціях і в професійному спілкуванні.

Основні складові термінологічного забезпечення:

формування терміносистеми – добір і визначення термінів, що описують ключові поняття галузі;

уніфікація та стандартизація терміносистеми – усунення дублетів, суперечностей, узгодження з національними та міжнародними стандартами (наприклад, ДСТУ, ISO, STANAG);

ведення термінологічних баз – створення електронних або друкованих словників, глосаріїв, баз даних;

актуалізація – постійне оновлення термінів відповідно до розвитку науки, техніки та нормативної бази;

методичне супроводження – розроблення правил, рекомендацій і методик використання термінів.

Основна актуальна на теперішній час потреба термінологічного забезпечення СЗТВ РЕБ – ВСТ стандартизованих термінів і визначень понять, призначений для узгодження технічних вимог до засобів (техніки) РЕБ, їх класифікацій і стандартів у галузі для підвищення ступеня її уніфікації та сумісності, інтеоперабельності систем та вдосконалення процесів масштабування діяльності сфери.

Вважаємо, що розроблення такого ВСТ за результатами формування, уніфікації та стандартизації терміносистем утворює формалізовану термінологічну базу СЗТВ, ведення якої передбачає його перевірку, перегляд або перевидання.

1.2. Аналіз прикладів чинних класифікацій техніки РЕБ. Класифікація виробів техніки РЕБ (за ієрархією система – комплекс – зразок – складник (комплектувальний виріб) – складана одиниця – деталь [12] – розподілення множини предметів постачання, які охоплює [9] група 58 «Апаратура зв'язку, виявлення і когерентного випромінювання» (Communication, Detection, and Coherent Radiation Equipmen) класу 5865 «Техніка радіоелектронної боротьби та швидкодіюча апаратура» (Electronic Countermeasures, Counter-Countermeasures and Quick Reaction Capability Equipmen), на підмножини (підкласи, види) за їх подібністю або відмінністю відповідно до прийнятих методів і ознак класифікації.

Для коректного поглиблення класифікації виробів РЕБ пропонуємо врахувати вимоги таких нормативних документів:

1) для однозначного формування положень класифікації потрібно зауважити, що відповідно до [11] можна об'єднувати терміни «система – комплекс – зразок» узагальненим терміном – «засіб РЕБ», який було введено для гармонізації з [9], виданим раніше;

2) згідно зі змістом положень [9] «... до його складу входить апаратура і складові частини засобів радіоелектронного подавлення, боротьби з радіопротицією, радіоелектронного забезпечення ...» та [11] щодо введення узагальненого терміна, позначимо підкласи виробів техніки РЕБ як підкласи засобів РЕБ;

3) відповідно до положень [2] у підгрупі спроможності Р-7.1. «Радіоелектронна боротьба» виділено такі спроможності:

Р-7.1.1. «Виявлення систем і засобів управління військами і зброєю противника, їх радіоелектронне подавлення»;

Р-7.1.2. «Радіоелектронний захист своїх систем і засобів управління»;

Р-7.1.23. «Радіоелектронний захист своїх систем і засобів управління, які відрізняються за змістом завдань РЕБ».

Матеріальною основою, що забезпечує виконання завдань за підгрупами спроможностей, є відповідні засоби РЕБ.

З врахуванням цих положень потрібне розподілення множини зразків (виробів техніки) РЕБ класу 5865 на підкласи до проведення фасетним методом за відмінністю підкласів за ознакою класифікації – функціональним призначенням.

Отже, підкласами класу 5865 можна визначити:

засоби РЕБ виявлення та подавлення системи радіоперешкодами, а також засоби управління військами та зброєю противника;

засоби РЕБ радіоелектронного захисту своїх систем і засобів управління;

засоби РЕБ виконання заходів ЕП РЕБ.

Визначені нами підкласи пропонуємо поділити на види засобів РЕБ залежно від їх призначення в межах підкласу.

1.3. Аналіз нормативних положень КСЗТВ до ОВТ щодо техніки РЕБ.

Розділ 2. Формування термінологічної бази СЗТВ до техніки РЕБ – розроблення термінологічних систем «Техніка радіоелектронної боротьби», «Класифікування та класифікація техніки радіоелектронної боротьби», «Система загальних технічних вимог до техніки радіоелектронної боротьби».

Для розроблення термінологічної бази СЗТВ РЕБ доцільно інтегрувати національні ДСТУ, зокрема [4, 12], і ВСТ, наприклад [10, 11], зі STANAG Terminology Database (NATO) (база термінів, що забезпечує уніфікацію військової та технічної лексики між країнами НАТО), терміносистемами ISO/IEC, ISO Online Browsing Platform (база термінів і визначень, закріплених у міжнародних стандартах ISO).

2.1. Розроблення термінологічної системи «Техніка радіоелектронної боротьби».

2.2. Розроблення термінологічної системи «Класифікування та класифікація техніки радіоелектронної боротьби».

2.3. Розроблення термінологічної системи «Система загальних технічних вимог до техніки радіоелектронної боротьби».

Розділ 3. Формування класифікаційної бази СЗТВ до техніки РЕБ – розроблення класифікаційної моделі техніки РЕБ

3.1. Розроблення основ (призначення, завдання, принципи) побудови класифікаційної моделі техніки РЕБ. Зауважимо, що класифікаційна модель – це тип математичної моделі, яку використовують для розбиття об'єктів або даних на класи (категорії) на основі їхніх характеристик. Такі моделі є інструментом машинного навчання та аналізу даних, що допомагає автоматично визначати, до якої групи належить новий елемент з урахуванням вивчених закономірностей.

Розглянемо принцип роботи цього інструменту (машинного навчання).

Навчання: модель аналізує набір даних, де кожен елемент уже віднесено до певного класу (наприклад, зображення засобу РЕБ із БпЛА чи засобу ЕП РЕБ).

Вивчення ознак: вона вивчає спільні ознаки, що характерні для кожного класу (наприклад, форма антен, база).

Прогнозування: після навчання модель може визначити клас нового, невідомого раніше об'єкта, порівнюючи його ознаки з вивченими закономірностями.

Типи класифікаційних моделей:

логістична регресія – проста, але ефективна модель для бінарної класифікації;

дерево рішень – візуально зрозуміла модель, що використовує набір правил для класифікації;

метод опорних векторів допомагає знайти оптимальну межу між класами;

нейронні мережі – більш складні моделі, здатні виявляти глибинні закономірності в даних.

3.2. Розроблення можливих варіантів класифікації техніки РЕБ

У ході цього етапу потрібно враховувати такі вимоги системи класифікації:

достатню ємність і необхідну повноту, які гарантують охоплення всіх об'єктів класифікації – техніки РЕБ, у заданих межах – РЕБ як складової електромагнітної боротьби;

виправдану глибину розподілення техніки РЕБ (групи, класи, підкласи, види, типи);

забезпечення можливості вирішення комплексу завдань різної спрямованості (техніка, тактика, підготовка персоналу тощо) для набуття спроможностей їх носіями у всіх ланках управління (застосування) зразків техніки РЕБ на етапах їх ЖЦ;

можливість розширення безлічі об'єктів, що класифікуються, внесення необхідних змін у структуру класифікації;

забезпечення можливості сполучення з іншими класифікаціями і класифікаторами [9] однорідних об'єктів.

Такі вимоги потребують особливої якості у виборі принципів і підстав логічного розподілу техніки РЕБ, які повинні однозначно розумітися під час наповнення класифікації РЕБ новими об'єктами – складовими РЕБ.

3.3. Визначення та перевірка раціонального варіанта та опис класифікації щодо формування СЗТВ до кожного відокремленого виду (класу) техніки РЕБ

Надалі необхідно розробити проєкт ВСТ «Комплексна система загальних технічних вимог до озброєння та військової техніки. Техніка радіоелектронної боротьби. Терміни та визначення понять, класифікація».

Додатками до цього проєкту можуть бути:

додаток А. Термінологічна системи «Техніка радіоелектронної боротьби»;

додаток Б. Термінологічна система «Класифікування та класифікація техніки радіоелектронної боротьби»;

додаток В. Термінологічна система «Система загальних технічних вимог до техніки радіоелектронної боротьби»;

додаток Г. Класифікація техніки радіоелектронної боротьби;

додаток Д. Проєкт технічного завдання на розроблення ВСТ «Комплексна система загальних технічних вимог до озброєння та військової техніки. Техніка радіоелектронної боротьби. Терміни та визначення понять, класифікація».

Висновки. У підсумку розроблено науковий апарат дослідження щодо термінологічної та класифікаційної баз формування СЗТВ ВТ ВДР, що підтримується систематизованою термінологічною базою для класифікування засобів ВТ ВДР, узгоджений із положеннями, нормативно встановленими КСЗТВ до ОВТ, який проілюстровано на прикладі техніки РЕБ.

Науковий апарат дослідження містить такі складові: актуальність; суперечність; проблему; об'єкт; предмет; мету, гіпотезу, завдання, методи, наукову новизну та практичну значущість.

Запропоновано структуру наукового дослідження щодо розроблення проєктів військового нормативного документа «Комплексна система загальних технічних вимог до ОВТ. Військова техніка з високою динамікою розвитку. Терміни та визначення понять. Класифікація».

Наступними етапами дослідження може стати реалізація отриманих наукових результатів під час виконання наукового (науково-технічного) супроводження розроблення проєкту зазначеного військового нормативного документа.

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. 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).

3. 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.

4. ДСТУ В 20.39.101:2021. Комплексна система загальних технічних вимог до озброєння та військової техніки. Основні положення. Чинний від 2021-28-12. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2022. 18 с.

5. ВСТ 20.39:0000.001:2025(02). Комплексна система загальних технічних вимог до озброєння та військової техніки. Система загальних технічних вимог до видів (типів) озброєння та військової техніки. Основні положення / Головне управління технічного оцінювання та контролю якості озброєння та військової техніки. 2025. 37 с.

6. Про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 11.11.2022 № 1275 : постанова Кабінету Міністрів України від 20.12.2024 № 1450. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1450-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 05.11.2025).

7. ВСТ 001.001:2023(01). Військова стандартизація. Вимоги до побудови, викладення, оформлення, позначення та змісту військових стандартів / Управління стандартизації, кодифікації та каталогізації. 2023. 87 с. URL: <https://mod.gov.ua/diyalnist/normativno-pravova-baza/vst-001-001-2023-01-viiskova-standartizatsiia-vimogi-do-pobudovi-vikladennia-oformlennia-poznachennia-ta-zmistu-viiskovikh-standartiv> (дата звернення: 15.11.2025).

8. Каталог військових стандартів станом на 11.01.2022 / Управління стандартизації, кодифікації та каталогізації. 2022. 45 с. URL: <https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/katalog-viiskovyh-standartiv-2022.pdf> (дата звернення: 05.11.2025).

9. Про затвердження національного класифікатора України ДК 020:2016 та скасування національного класифікатора України ДК 020:2004 : наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 20.12.2016 № 2095 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2095731-16#Text> (дата звернення: 15.11.2025).

10. ВСТ 01.114.001-2023(01). Електромагнітна та кіберборотьба. Глосарій термінів та визначень / Управління стандартизації, кодифікації та каталогізації. 2023. 63 с. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_1211_22947168.pdf (дата звернення: 15.11.2025).

11. ВСТ 602.001:2024(01). Електромагнітна та кіберборотьба. Радіоелектронна боротьба. Терміни та визначення / Управління стандартизації, кодифікації та каталогізації. 2023. 48 с. URL: https://milstand.knu.ua/uploads/p_1209_66c84a8f9944e.pdf (дата звернення: 05.11.2025).

12. ДСТУ В 8821-1:2018. Стандартизація у сфері озброєння та військової техніки. Ч. 1. Основні терміни та визначення понять. Зміна № 1 (ПІС № 4-2023). Чинний від 2023-20-04. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2022. 18 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=102727 (дата звернення: 05.11.2025).

13. Шаманов Д. О., Сорокін А. Р. Аналіз сучасних методів радіоелектронної боротьби // Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. Т. 1 (75). С. 211–214. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.211>
14. 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.
15. Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування основних засобів радіоелектронної боротьби (ближньої дії) російської федерації // Г. В. Худов, І. Ю. Грідасов, І. А. Хижняк та ін. // Системи управління, навігації та зв'язку. Харків : ХНУПС., 2024. № 4. С. 209–218. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.209>
16. Міжнародний центр оборонних досліджень. російська радіоелектронна боротьба до 2025 року. ICDS Report. URL: https://www.icds.ee/wp-content/uploads/2018/ICDS_Report_Russias_Electronic_Warfare_to_2025.pdf (дата звернення: 15.11.2025).
17. Іщенко Д. А., Федорчук Д. Л., Марищук Л. М. Підхід до вдосконалення термінологічної системи з радіоелектронної боротьби // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. 2024. Вип. 26 (І). С. 40–57. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.04>
18. Зброя російсько-української війни 2022–2024 років (книга друга) : Довідник-каталог основних зразків озброєння та військової техніки / МО України, Генштаб ЗС України, Центр досліджень воєнної історії. Київ : Ліра-К, 2024. 310 с.
19. NATO Supply Group and Class Handbook ACodP-2 (The Allied Codification Publication No. 2). URL: <https://www.dla.mil/Working-With-DLA/Federal-and-International-Cataloging/NATO/> (last accessed: 05.11.2025).
20. ACodP-3 (NATO Multilingual Item Name Directory). URL: <https://www.dla.mil/Working-With-DLA/Federal-and-International-Cataloging/NATO/> (last accessed: 05.11.2025).
21. ДСТУ В 15.001:2023. Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Основні положення. Чинний від 2023-18-09. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 26 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104861 (дата звернення: 05.11.2025).
22. Самсонов В. В., Сільвестров А. М., Тачиніна О. М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2022. 385 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2e87cf56-8154-4565-9392-2e34b0f60356/content> (дата звернення: 03.11.2025).
23. Момот О. Методологія та організація наукових досліджень : навч.-метод. посіб. Полтава : ПП Астроя, 2023. 99 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058266.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 25.11.2025.

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. Yedynyi perelik (Kataloh) spromozhnostei Ministerstva oborony Ukrainy, Zbroinykh Syl Ukrainy ta inshykh skladovykh Syl oborony, zatverdzhnyi 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].
3. Pro zatverdzhennia Instruksii z formuvannia operatyvno-stratehichnykh, operatyvno-taktychnykh ta zahalnykh vymoh do perspektyvnykh (novykh, modernizovanykh) system (kompleksiv, zrazkiv) ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky 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].
4. DSTU V 20.39.101:2021. Kompleksna systema zahalnykh tekhnichnykh vymoh do ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Osnovni polozhennia [Comprehensive System of General Technical Requirements for Weapons and Military Equipment. Main Provisions]. (2021). Kyiv [in Ukrainian].
5. VST 20.39:0000.001:2025(02). Kompleksna systema zahalnykh tekhnichnykh vymoh do ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Systema zahalnykh tekhnichnykh vymoh do vydiv (typiv) ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Osnovni polozhennia [Comprehensive System of General Technical Requirements for Weapons and Military Equipment. System of General Technical Requirements for Types (Types) of Weapons and Military Equipment. Main Provisions]. (2025). Kyiv [in Ukrainian].
6. Pro vnesennia zmin do postanovy Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.11.2022 № 1275 : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 20.12.2024 № 1450 [On Amendments to the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 11.11.2022 № 1275: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 20.12.2024 № 1450]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1450-2024-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
7. VST 001.001:2023(01). Viiskova standartyzatsiia. Vymohy do pobudovy, vykladennia, oformlennia, poznachennia ta zmistu viiskovykh standartiv [Military Standardization. Requirements for the Construction, Presentation, Design, Designation and Content of Military Standards]. (2023). Retrived from <https://mod.gov.ua/diyalnist/normativno-pravova-baza/vst-001-001-2023-01-viiskova-standartizatsiia-vimogi-do-pobudovi-vikladennia-oformlennia-poznachennia-ta-zmistu-viiskovykh-standartiv> [in Ukrainian].
8. Kataloh viiskovykh standartiv stanom na 11.01.2022 [Catalog of Military Standards as of 11.01.2022]. Retrived from <https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/katalog-vijskovykh-standartiv-2022.pdf> [in Ukrainian].

9. Pro zatverdzhennia natsionalnoho klasyfikatora Ukrainy DK 020:2016 ta skasuvannia natsionalnoho klasyfikatora Ukrainy DK 020:2004: nakaz Ministerstva ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy vid 20.12.2016 № 2095 [On Approval of the National Classifier of Ukraine DK 020:2016 and Cancellation of the National Classifier of Ukraine DK 020:2004: Order of the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine from 20.12.2016 № 2095]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2095731-16#Text> [in Ukrainian].
10. VST 01.114.002-2023 (01). Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba v povitrianykh operatsiiakh [Electromagnetic and Cyber Warfare. Electronic Warfare in Air Operations]. Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_1212_22364672.pdf [in Ukrainian].
11. VST 602.001-2024 (01). Elektromahnitna ta kiberborotba. Radioelektronna borotba. Terminy ta vyznachennia [Electromagnetic and Cyber Warfare. Electronic Warfare. Terms and definitions]. Retrived from https://milstand.knu.ua/uploads/p_1209_66c84a8f9944e.pdf [in Ukrainian].
12. DSTU V 8821-1:2018. Standartyzatsiia u sferi ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Ch. 1. Osnovni terminy ta vyznachennia poniat. Zmina № 1 (IPS № 4-2023) [Standardization in the Field of Weapons and Military Equipment. Part 1. Basic Terms and Definitions of Concepts. Amendment № 1 (IPS № 4-2023)]. Retrived from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=102727 [in Ukrainian].
13. Shamanov, D. O., & Sorokin, A. R. (2024). Analiz suchasnykh metodiv radioelektronnoi borotby [Analysis of modern methods of electronic warfare]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku* [Systems of control, navigation and communication], 1 (75), 211–214. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.211> [in Ukrainian].
14. 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].
15. Khudov, H. V., Hridasov, I. Yu., & Khyzhniak, I. A., 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 Application of the Main Means of Electronic Warfare (Close-Range) of the russian federation]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku* [Control, navigation and communication systems], 4, 209–218. Kharkiv. <https://doi:10.26906/SUNZ.2024.4.209> [in Ukrainian].
16. Mizhnarodnyi tsentr oboronnykh doslidzhen. rosiiska radioelektronna borotba do 2025 roku [International Center for Defense Studies. russian electronic warfare to 2025]. ICDS Report. Retrived from https://www.icds.ee/wp-content/uploads/2018/ICDS_Report_Russias_Electronic_Warfare_to_2025.pdf [in Ukrainian].
17. Ishchenko, D. A., Fedorchuk, D. L., & Maryshchuk, L. M. (2024). Pidkhyd do vdoskonalennia terminolohichnoi systemy z radioelektronnoi borotby [Approach to Improving the Terminological System of Electronic Warfare]. *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), 40–57. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.04> [in Ukrainian].

18. *Zbroia rosiisko-ukrainskoi viiny 2022–2024 rokiv (knyha druha): Dovidnyk-kataloh osnovnykh zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Weapons of the russian-Ukrainian War of 2022–2024 (2nd book): Handbook-Catalog of the Main Samples of Weapons and Military Equipment]*. (2024). Kyiv [in Ukrainian].

19. *NATO Supply Group and Class Handbook ACodP-2* (The Allied Codification Publication No. 2). Retrived from <https://www.dla.mil/Working-With-DLA/Federal-and-International-Cataloging/NATO/>

20. *ACodP-3 (NATO Multilingual Item Name Directory)*. Retrived from <https://www.dla.mil/Working-With-DLA/Federal-and-International-Cataloging/NATO/>

21. *DSTU V 15.001:2023. Systema keruvannia zhyttievym tsyklom ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Osnovni polozhennia. [Life Cycle Management System of Weapons and Military Equipment. Basic Provisions]*.(2023). Kyiv. Retrived from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104861 [in Ukrainian].

22. Samsonov, V. V., Silvestrov, A. M., & Tachynina, O. M. (2022). *Metodolohiia naukovykh doslidzen ta pryklady yii vykorystannia: navch. posib. [Methodology of Scientific Research and Examples of Its Use: Textbook]*. Kyiv. Retrived from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2e87cf56-8154-4565-9392-2e34b0f60356/content> [in Ukrainian].

23. Momot, O. (2023). *Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzen : navch.-metod. posib. [Methodology and Organization of Scientific Research: Teaching and Methodological Manual]*. Poltava. Retrived from <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058266.pdf> [in Ukrainian].

D. A. Ishchenko, V. V. Strinada, L. M. Maryshchuk

PRINCIPLES OF FORMING THE TERMINOLOGICAL AND CLASSIFICATION FRAMEWORK OF THE SYSTEM OF GENERAL TECHNICAL REQUIREMENTS FOR MILITARY EQUIPMENT WITH HIGH DEVELOPMENT DYNAMICS

The analysis of trends in the development of electronic warfare equipment and unmanned systems demonstrates their crucial role in achieving technological superiority over the adversary. The high development dynamics of these types of military equipment highlight the relevance of establishing systems of general technical requirements, which are essential for acquiring new capabilities under resource constraints.

Enhancing the efficiency of military equipment high development dynamics development throughout the life cycle is possible through the standardization of requirements, which ensures: scalability of products (serial and mass production); optimization of testing processes; improved efficiency of logistical support.

The implementation of this approach requires the introduction systems of general technical requirements for relevant groups of products. Currently, national regulatory documents and military standards are being developed and implemented in Ukraine, forming the basis for such systems.

At the same time, a significant challenge in the development of military equipment high development dynamics is the imperfection of the terminological and classification framework, caused by the rapid pace of technological change and the variability of products.

This article examines the scientific and methodological foundations for forming the terminological and classification framework necessary for creating systems of general technical requirements for military equipment high development dynamics. The relevance of the study is determined by the need to: unify approaches to technical regulation of military equipment high development dynamics; ensure compatibility with international standards (in particular, STANAG); increase the efficiency of development, operation, and modernization of relevant systems.

The scientific apparatus of the study includes: a conceptual and terminological system; principles of classification; structural and functional features of military equipment high development dynamics; methodology for building systems of general technical requirements.

The terminological framework ensures consistency in the interpretation of key concepts across regulatory documents, technical specifications, and standards. The classification framework enables the systematization of military equipment high development dynamics according to such criteria as purpose, basing, design features, level of autonomy, and tactical-technical characteristics.

The practical significance of the study lies in establishing a foundation for the standardization of military equipment high development dynamics, harmonization of Ukrainian regulatory documents with international requirements, and provision of methodological support for developers, experts, and regulators. The proposed approach contributes to enhancing the systemic nature, transparency, and manageability of technical regulation processes in the defense sector.

Keywords: *terminology; classification; military equipment with high development dynamics; general technical requirements; scientific apparatus.*

Б. І. Тертишний., А. А. Нікітін, І. С. Мещеряков, О. М. Сампір, А. Г. Кенгерлі

МОДЕЛЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРОЗДІЛІВ АЕРОЗОЛЬНОГО МАСКУВАННЯ В НАСТУПІ ЗА СТАНДАРТАМИ НАТО

Статтю присвячено обґрунтуванню та формуванню моделі застосування підрозділів аерозольного маскування в наступальних діях відповідно до вимог і стандартів НАТО. Наступальні дії сучасних військ характеризуються високою динамікою, швидкою зміною форм і способів ведення бою, необхідністю дезорганізації систем управління противника та створення переваги на вибраному напрямку. Згідно з підходами НАТО аерозольне маскування розглядається не як допоміжний засіб, а як інтегрований елемент підтримки, здатний забезпечити прихованість, раптовість і маневреність сил на всіх етапах наступу, а також безперервність та темп наступальних дій.

З урахуванням сучасних загроз застосування високоточної зброї, безпілотних літальних апаратів та засобів наведення противника на сьогодні є проблема відсутності цілісної, адаптивної моделі, здатної описати оптимальні способи використання аерозольного маскування в наступі з урахуванням стандартів НАТО. Традиційні підходи здебільшого орієнтовані на статичні або частково динамічні сценарії, що не відображають реалій наступальних дій із високим темпом.

Запропонована модель застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі формує його цілісну структуру, що охоплює тактичні аспекти використання аерозолів, зокрема приховування маневру, введення противника в оману, маскування пророблення проходів, ураження засобів розвідки противника та підтримку вогневих дій.

Розроблена модель є динамічною, адаптивною й багатомодульною системою, що відповідає стандартам НАТО та забезпечує ефективне використання аерозольних засобів у широкому спектрі наступальних дій. Вона інтегрує теоретичні положення, тактичні вимоги та математичні залежності в комплексний інструмент планування й управління, що дозволяє зменшити ризик виявлення військ, підвищити їх живучість, забезпечити дезорганізацію противника та сприяє підтриманню темпу наступу. Модель може бути використана як основа для подальшого розроблення автоматизованих систем планування та управління аерозольним маскуванням відповідно до сучасних вимог ведення бойових дій.

Ключові слова: наступ; аерозольне маскування; аерозольна протидія; димовий засіб; модель; ризик; захист; ефективність.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Наступальні дії характеризуються жорстокістю, зосередженням військ, дезорганізацією сил противника і швидким переходом від однієї форми дій до іншої [1]. Використання аерозольного маскування збільшує можливості командира скерувати всю бойову міць у потрібний час і в необхідному місці задля перемоги над противником [2]. Крім того, воно забезпечує підтримку будь-якому

© Б. І. Тертишний, А. А. Нікітін, І. С. Мещеряков, О. М. Сампір, А. Г. Кенгерлі, 2025

етапу наступальних дій на усіх рівнях, оскільки аерозольне маскування, як правило, надає перевагу стороні, яка здійснює наступ.

Для більшого розуміння застосування підрозділів аерозольного маскування за стандартами НАТО в наступі [2, 3] пропонуємо побудувати відповідну модель застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі (далі – Модель наступу), метою створення якої є оптимізація процесів аерозольного маскування в ході наступу [1, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій [5–14] доводить, що використання аерозольного маскування під час наступальних дій вимагає ретельного планування і реалізації, щоб запобігти перешкодам для пересування, штурмовим діям або цілевизначенню [3], зберегти елемент раптовості й уникнути відслідковування чи привернення зайвої уваги до власних сил. Проте воно не позбавлене ризиків [15]. Застосування аерозольного маскування має підвищити живучість власних сил [16] без серйозного погіршення їх боєздатності та зменшити можливості командування, управління, зв'язку і збору розвідувальних даних сил противника [17].

Головне завдання аерозольного маскування в наступі – подавити зусилля противника, приховати маневр і сили наступу, а також сприяти проведенню тактичних дій щодо введення ворога в оману [2], тобто позбавити його інформації про дислокацію та склад наших сил задля забезпечення ефекту раптовості для нього та безпеки наших військ. Це також дозволяє командирів гнучко маневрувати силами, необхідними для проведення атаки [1].

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є створення Моделі застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі, в основі якої лежить оптимізація процесів застосування аерозольного маскування в умовах різних тактичних сценаріїв, забезпечення підвищення живучості військ, підтримання темпу наступу та формування умов для раптовості й дезорганізації противника.

Виклад основного матеріалу. За стандартами НАТО аерозольне маскування в наступі – це не допоміжний, а інтегрований елемент маневру та вогневої підтримки. Його системне застосування зводиться до динамічного управління маскувальними параметрами для досягнення тактичної переваги [18].

Розглянемо реалізацію аерозольного маскування в наступі як бойового множника за принципами застосування з відповідними аспектами моделювання:

принцип живучості реалізується шляхом створення аерозольних завіс для захисту атакуючих сил від високоточної зброї [19] та тепловізійного наведення протягом $T_{\text{крит}}$. Аспектом моделювання є оптимізація критичної (максимальної) щільності ($C_{\text{крит}}^{\text{Тепловізій}}$) згідно з розрахунком мінімальної необхідної маси аерозолі (Q_{total}) для миттєвого осліплення;

принцип збереження темпу (мобільності своїх підрозділів) забезпечується осліпленням ворожих спостережних пунктів та вогневих точок, щоб усунути їхню здатність до коригування. Аспектом моделювання є прогнозування (T_{target}), яке забезпечує, щоб $T_{\text{пуск}}$ артилерії дозволив завісі сформуватися до моменту необхідного маневру;

принцип введення противника в оману реалізується постановкою хибних завіс або використанням мультиспектрального аерозолію [18] для маскування перегруповання військ на флангах. Аспектом моделювання є оцінювання ризику виявлення – кількісний показник зниження ризику ($R(E)$) для підрозділів у зоні маскування.

Для перетворення цих принципів на прогнозовану Модель наступу ми абстрагуємо кожен сценарій до набору критичних функціональних завдань.

Сценарій 1 – прорив оборони противника, максимального імпульсу, коли час є дорожчим за ресурс. Ключова мета моделі – прогнозування та оптимізація Q_{total} для створення стійкої завіси, що діє $T_{штурм}$ (15–30 хв); абстракція:

$$Q_{total} \propto C_{крит}^{Тепловий} L_{номр} H_{ef} K_u T_{штурм}. \quad (1)$$

Модель наступу має розрахувати $N_{снарядів}$ та їхній $T_{пуск}$ з урахуванням потреби перекрити оптичний, інфрачервоний (ІЧ) та радіолокаційний діапазони. Артилерія є пріоритетним інструментом.

Сценарій 2 – висування й оцінювання живучості, коли аерозольне маскування застосовують для захисту від раптового виявлення (особливо дронами). Ключова мета моделі – визначення відсотка зниження ризику ($R(E)$) для підрозділу, що висувається, на основі поточної інтенсивності ворожої розвідки ($E_{БнЛА}$) та M_u ; абстракція:

$$R_{зниж} = f\left(\frac{C_{факт}}{C_{Тепловий}^{крит}}\right) f(\text{загасання сигналу}). \quad (2)$$

Модель наступу використовує генератори [3] або мобільні засоби для створення локальних динамічних аерозольних завіс. Ключовий показник – час «чистого вікна» (період, коли дрон може прицілитися) [19].

Сценарій 3 – форсування водної перешкоди, логістичної оптимізації для довготривалого аерозольного маскування. Ключова мета моделі – розрахунок мінімізованої потреби в ресурсах (Q_{min}) для підтримання маскування $T_{форсування}$ (4–6 год) з урахуванням прогнозу погоди; абстракція [20]:

$$Q_{min} = \sum_{t=1}^{T_{форсування}} P_t(t) \Delta t. \quad (3)$$

$P_t(t)$ має динамічно коригуватися на основі прогнозованої зміни напрямку вітру та вимагає використання генераторів [3]. Модель наступу повинна прогнозувати необхідність переміщення генераторів.

Отже, Модель наступу має бути побудована на трьох взаємопов'язаних, але незалежних функціональних модулях, які активуються відповідно до тактичного завдання:

модуль Q_{total} (артилерія) відповідає за прорив, коли час є критичним;

модуль $R_{зниж}$ (динаміка) відповідає за висування, де критичними є живучість [16] і своєчасність [3];

модуль Q_{min} (логістика) відповідає за форсування, коли критичними є довготривалість та економія [18].

Усі три модулі інтегруються через спільну базу даних $C_{крит}^{Тепловий}$ та K_u (коефіцієнт вітру), що дозволяє системі швидко перемикатися між пріоритетами, максимізуючи ефективність аерозольного маскування як бойового множника.

Виходячи із системного аналізу та вимог стандартів НАТО до наступальних дій (де маскування є бойовим множителем для підвищення живучості та темпу) [1], необхідно обрати динамічну багатомодульну модель.

Варто зауважити, що Модель наступу є ідеальною, оскільки не обмежується єдиним набором правил, а адаптується до трьох критичних тактичних сценаріїв, кожен із яких має свою ключову мету.

Розглянемо основні характеристики Моделі, яка функціонує як система управління, керована цілями, де інструмент і розрахунок змінюються залежно від фази наступу:

прорив оборони, ключовою метою моделі є прогнозування та оптимізація Q_{total} для створення стійкої завіси; пріоритетний ресурс – артилерія / міномети (для миттєвості);

висування, ключова мета моделі – оцінювання живучості та зниження ризику ($R_{зниж}$) від дронів; пріоритетний ресурс – мобільні генератори / транспортні засоби (для динаміки);

форсування водної перешкоди, ключова мета моделі – оптимізація Q_{min} [18] для довготривалого маскування (4–6 год); пріоритетний ресурс – стаціонарні генератори (для економії).

Модель наступу складається з трьох ключових модулів, які забезпечують її функціонування як бойового множника:

1. Модуль оптимізації імпульсу (Q_{total}), що призначений для використання під час прориву: дія – Модель наступу розраховує мінімально необхідну кількість снарядів ($N_{снарядів}$) для досягнення $C_{крит}^{Тепловий}$ на лінії зіткнення протягом $T_{итурм}$ (15–30 хв); ключовий фактор – точна синхронізація $T_{пуск}$ артилерії з часом початку маневру.

2. Модуль оцінки живучості ($R_{зниж}$), який застосовують у ході висування: дія – Модель наступу оцінює, наскільки фактична щільність аерозолі ($C_{факт}$) знижує ймовірність виявлення ворожими безпілотними літальними апаратами (БпЛА), за формулою (2); ключовий фактор – динамічна корекція маршруту та швидкості руху підрозділу на основі M_u .

3. Модуль логістичної оптимізації (Q_{min}), який використовують під час форсування: дія – Модель наступу прогнозує загальну мінімальну потребу в ресурсах (Q_{min}) для багаточасового маскування з урахуванням прогнозованої зміни напрямку вітру ($K_u(t)$) та необхідності переміщення генераторів; ключовий фактор – стійкість та ефективність витрат протягом тривалого часу.

Обрання динамічної багатомодульної моделі дозволяє забезпечити необхідну адаптивність та прогнозованість аерозольного маскування, перетворюючи його на ефективний бойовий множник у всіх фазах наступальної операції.

Проведемо формалізацію Моделі наступу, абстрагувавши її ключові цілі (прорив, висування, форсування) у математичні функції та керуючі параметри.

Загальний вхідний вектор системи S керується критичними змінними, спільними для всіх модулів:

$$S = \{E_{\text{загрози}}, M_u, T_{\text{ман}}, L_{\text{потр}}, Q_{\text{ресурси}}\}, \quad (4)$$

де $E_{\text{загрози}}$ – параметр загрози, комплексна оцінка засобів ворога (тепло, БПЛА, радіолокаційні станції (РЛС)) [21, 22];

M_u – параметр метеоумов (швидкість та напрямок вітру K_u) [16, 20];

$T_{\text{ман}}$ – параметр часу маневру (критичний час, необхідний для виконання завдання);

$L_{\text{потр}}$ – параметр простору (довжина / площа ділянки, яку потрібно замаскувати);

$Q_{\text{ресурси}}$ – параметр ресурсу (наявність снарядів (Q_{ammo}) та суміші (Q_{fuel})).

Ключові цілі моделі формалізуються через три незалежні модулі, кожен із яких оптимізує свою цільову функцію:

модуль прориву (оптимізація імпульсу), метою якого є максимізувати щільність ($C_{\text{тепловий крит}}$) для маскування прориву протягом $T_{\text{шттурм}}$, пріоритет – артилерія.

Керуюча функція – розрахунок необхідної маси аерозолю (Q_{total}) та часу пуску ($T_{\text{пуск}}$):

$$Q_{\text{total}} = C_{\text{тепловий крит}} L_{\text{потр}} H_{\text{еф}} K_u T_{\text{шттурм}}, \quad (5)$$

де $C_{\text{тепловий крит}}$ – необхідна щільність для маскування всіх діапазонів (ІЧ, РЛС);

$H_{\text{еф}}$ – ефективна висота завіси;

K_u – коефіцієнт корекції на вітер.

Критичний параметр – синхронізація, коли $T_{\text{пуск}}$ має забезпечити формування завіси до $T_{\text{почшттурм}}$:

$$T_{\text{пуск}} = T_{\text{почшттурм}} - T_{\text{формування}}; \quad (6)$$

модуль висування (оцінювання живучості), його метою є кількісна оцінка зниження ризику виявлення ($R_{\text{зниж}}$) під час руху [16], пріоритет – мобільні аерозолегенератори.

Зниження ризику визначається через відношення фактичної щільності ($C_{\text{факт}}$) до потрібної ($C_{\text{тепловий крит}}$) та коефіцієнт виявлення α [15]:

$$R_{\text{зниж}} = 1 - \exp\left(-\alpha \frac{C_{\text{факт}}}{C_{\text{тепловий крит}}}\right), \quad (7)$$

де $C_{факт}$ – щільність, яку можуть забезпечити генератори / ТЗ;

α – коефіцієнт ефективності, що залежить від типу ворожого дрона ($E_{БпЛА}$).

Критичний параметр – час реакції ($T_{reaction}$), який має бути меншим за час прицілювання ворожого БпЛА (T_{target}) [19]:

$$Рішення = \begin{cases} \text{Генератори, якщо } T_{reaction} \leq T_{target}; \\ \text{Артилерія, якщо } T_{reaction} > T_{target}; \end{cases} \quad (8)$$

модуль форсування (логістична оптимізація), метою якого є мінімізація витрати ресурсів (Q_{min}) [18] для підтримання маскування протягом тривалого часу ($T_{форсування} = 4-6$ год), пріоритет – стаціонарні генератори. Цільовою функцією є мінімізація інтегральної витрати палива / аерозолеутворювальних речовин (АУР):

$$Q_{min} = \min \left(\int_0^{T_{форсування}} P_t(t) dt \right), \quad (9)$$

де P_t – динамічна корекція, коли продуктивність P_t коригується на основі прогнозованої зміни вітру $M_u(t)$ та необхідності переміщення генераторів [3]:

$$P_t(t) = P_{база} K_u(t) K_{переміщ}(t), \quad (10)$$

де $K_{переміщ}(t)$ – коефіцієнт, що враховує витрати на переміщення генераторів у разі зміни напрямку вітру [3, 20].

Фінальне рішення системи D – це команда на використання ресурсу (що, де і коли) [17]:

$$D = \{ \text{Тип інструменту}, P_t / N_{снарядів}, T_{пуск} / T_{довгозтрив}, \text{Координати} \}. \quad (11)$$

Отже, формалізація Моделі вимагає три різні математичні підходи, інтегровані через спільні параметри навколишнього середовища (M_u) та чітке визначення $T_{ман}$ для кожної фази [3].

Пропонуємо розробку тримодульного алгоритму керування для Моделі наступу, кожен із яких (прорив, висування, форсування) має окремий алгоритм, що реалізує його цільову функцію.

Модуль прориву (оптимізація Q_{total}) має на меті розрахунок параметрів для миттєвої артилерійської завіси:

вхідні дані: $T_{шторм}$, $L_{потр}$, M_u , $T_{поч.шторму}$, $E_{загрози}$;

розрахунок $C_{крит}^{Тепловий}$ – визначаємо необхідну щільність ($C_{крит}^{Тепловий}$) для маскування всіх діапазонів (ІЧ, РЛС) на основі $E_{загрози}$;

корекція на вітер – розраховуємо коефіцієнт вітру (K_u):

$$K_u = 1,0 + \max\left(\frac{0, (M_u - M_u^{баз})}{M_u^{баз}}\right); \quad (12)$$

розрахунок загальної маси (Q_{total}) (5);

визначення $N_{снарядів}$ – переводимо Q_{total} у кількість снарядів / мін ($N_{снарядів}$) на основі характеристик боєприпасу;

розрахунок $T_{пуск}$ – обчислюємо час пуску ($T_{пуск}$), синхронізований із $T_{почитурму}$ (6);

вихід – сформувані запит вогню до системи управління вогнем: $\{N_{снарядів}, T_{пуск}, Координати\}$.

Модуль висування (оцінка $R_{зниж}$) передбачає оцінювання рівня зниження ризику виявлення від БпЛА [22] та вибір оптимального інструменту:

вхідні дані: $E_{БпЛА}$, M_u , $C_{факт}$ (поточна щільність), T_{target} (час прицілювання дрона);

оцінювання $R_{зниж}$ – розрахувати відсоток зниження ризику виявлення для підрозділу, що рухається (7);

оцінювання $T_{reaction}$ – розрахувати час, необхідний мобільним генераторам для досягнення $C_{крит}^{Тепловий}$ [21];

вибір інструменту (динамічне рішення): якщо $T_{reaction} \leq T_{target}$, то команда «Використовувати мобільні генератори»; якщо $T_{reaction} > T_{target}$ та дозволяє наявність снарядів (Q_{ammo}), то команда «Вогонь димовими снарядами артилерії»; якщо аерозольне маскування неефективне, то команда «Збільшити швидкість висування»;

вихід – команда на маневр (коригування швидкості / маршруту) або оперативний запит вогню.

Модуль форсування (оптимізація Q_{min}), мета якого полягає в мінімізації витрат ресурсів [18] для довготривалого маскування:

вхідні дані: $T_{форсування}$, $L_{потр}$ (критичні ділянки), $M_u(t)$ (на 4–6 год) [20];

ітеративний розрахунок $P_t(t)$ – визначити необхідну продуктивність P_t для кожного часового інтервалу Δt на основі прогнозованого вітру $M_u(t)$ (10);

прогнозування переміщення: якщо прогноз $M_u(t)$ показує зміну напрямку, що призводить до втрати покриття, тоді потрібно розрахувати $T_{переміщ}$ та включити додаткові витрати $K_{переміщ}$ у Q_{min} ;

розрахунок Q_{min} (9) – підсумувати витрати;

вихід – логістичний запит на мінімально необхідну кількість палива / АУР (Q_{min}) та план переміщення аерозолегенераторів.

Описана Модель наступу дозволяє системі використовувати дорогий, але швидкий ресурс (артилерію) у критичних за часом ситуаціях (прорив, FPV-загроза), а також

дешевий, проте повільний (аерозолегенератори) у ситуаціях, коли пріоритетом є довготривалість (форсування).

Запропонована Модель наступу забезпечує прогнозованість, знижуючи елемент несподіванки, надаючи командуванню чисельні показники $R_{зниж}$ та точні потреби в ресурсах (Q_{total} , Q_{min}). Її застосування доводить, що маскування не порушує темпу операції, а навпаки – підтримує його відповідно до стандартів НАТО.

Висновки. Узагальнюючи результати дослідження, присвяченого розробленню моделі застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі, можна стверджувати, що ефективність наступальних дій у сучасних умовах значною мірою залежить від здатності військ забезпечувати прихованість, динамічність і раптовість маневру в умовах всебічної дії засобів розвідки противника. Аерозольне маскування, інтегроване у структуру управління боєм відповідно до стандартів НАТО, перетворюється з допоміжного заходу в повноцінний елемент бойової підтримки, що безпосередньо впливає на результативність операції.

Розроблено динамічну модель застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі, яка забезпечує оптимізацію для підтримки атаки, коли пріоритетом є оперативність для швидкого осліплення противника та маскування зосередження ударних груп (резервів). Вона базується на використанні швидких засобів доставляння (артилерії). Її пріоритетом є стійкість для довготривалого екранування комунікацій та логістики, а основою – використання генераторів.

Наукова новизна моделі полягає у формуванні багатокомпонентної системи оцінювання та планування, здатної узгоджувати тактичні потреби, фізичні властивості аерозолів і динаміку бойової обстановки. Вона синтезує сучасні вимоги стандартів НАТО та реальний досвід бойового застосування маскувальних засобів, адаптуючи їх до умов сучасної війни, зокрема до активного використання БПЛА, мультиспектральних сенсорів та високоточної зброї противника. Це створює підґрунтя для подальшого розвитку науково-практичних рекомендацій, оновлення керівних документів та впровадження інноваційних технічних рішень.

Отже, запропонована модель є комплексним інструментом, який дозволяє оптимізувати процеси застосування підрозділів аерозольного маскування в наступі, забезпечити раціональне використання ресурсів та підвищити ефективність бойових дій відповідно до сучасних вимог. Вона може бути використана як практичний алгоритм у діяльності штабів, як основа для підготовки фахівців, а також як наукова база для подальших досліджень у сфері маскування, прикриття та забезпечення живучості військ. Реалізація моделі сприятиме підвищенню стійкості бойових порядків, зниженню втрат і формуванню необхідних умов для успішного ведення наступальної операції в складних умовах сучасного багатовимірного поля бою.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. STANAG 4107. Mutual Acceptance of Government Quality Assurance and Usage of NATO Quality Assurance Publications. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), November 9,

2018. URL: <https://ru.scribd.com/document/654191405/Aqap-4107-Eng-en-Data> (last accessed: 02.11.2025).

2. Allied Joint Publication (AJP) 3.15. Allied Joint Doctrine for Countering Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Threats. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), February 2018. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/686715/doctrine_nato_countering_ied_ajp_3_15.pdf (last accessed: 02.11.2025).

3. Allied Joint Publication (AJP) 3.20. Allied Joint Doctrine for Force Protection. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), January 2020. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f086ec4d3bf7f2bef137675/doctrine_nato_cyberspace_operations_ajp_3_20_1_.pdf (last accessed: 10.11.2025).

4. PAA Analysis in Severely Restricted Terrain. Kansas : Center for Army Lessons Learned, January 2024. № 24–846. URL: <https://api.army.mil/e2/c/downloads/2024/01/25/a8b49a1b/24-846-paa-analysis-jan-22-public.pdf> (last accessed: 10.11.2025).

5. Мещеряков І. С. Удосконалена методика оцінювання ефективності посилення захисту військ із застосуванням аерозолів // Труди університету. 2023. № 1 (176). С. 50–65.

6. Порівняльний аналіз засобів аерозольного маскуванню, які знаходяться на озброєнні у Збройних Силах України та армій західних країн-партнерів / І. Танцюра, О. Клімов, О. Стаховський, С. Гузенко // Військово-технічний збірник. 2024. № 30. С. 8–13. URL: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13>

7. Аналіз факторів, що впливають на визначення дальності видимості об'єктів крізь аерозольну завісу / А. В. Писарев, А. Ф. Лазутський, С. А. Тузіков, С. А. Писарев // 36. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. 2019. № 3 (61). С. 18–23. URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/issue/archive/2> (дата звернення: 01.11.2025).

8. Аналіз засобів аерозольної протидії Сухопутних військ Збройних Сил України / К. В. Коритченко, І. І. Танцюра, О. П. Клімов, О. В. Стаховський // Механіка та машинобудування. Харків : НТУ “ХПІ”, 2021. № 2. С. 26–30.

9. Розробка напівавтоматичної системи аерозольного маскуванню для не спеціалізованого військового та евакуаційного транспорту / С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов, В. О. Колесник та ін. // Методи та прилади контролю якості. 2024. № 2 (53). С. 94–104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104)

10. Пасічник В. Аерозольне маскуванню: як військові використовують “димові завіси” на фронті. Гвара Медіа. 2025. <https://gwaramedia.com/aerazolne-maskuvannya-yak-vijskovi-vikoristovuyut-dimovi-zavisi-na-fronti/> (дата звернення: 01.11.2025).

11. Маскуванню військ та об'єктів. Захист від високоточної зброї : навч. посіб. / В. В. Пугач, В. П. Чепурний, А. І. Куртов та ін. Харків : ВІОІ НІОУ ім. Ярослава Мудрого, 2022. 116 с. https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/maskuvannya_viisk.pdf (дата звернення: 20.11.2025).

12. Порядок використання засобів аерозольного маскуванню // Sprotyv G7. URL: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/poryadok-vikoristannya-zasobiv-aerazolnogo-maskuvannya> (дата звернення: 10.11.2025).

13. Pre-release: Methods of Identifying and Evaluation the Camouflage and Deceptive Properties of the Military Equipment in Land Field Trials // NATO Science and Technology Organization

(STO). Brussels, July 17, 2025. URL: <https://www.sto.nato.int/document-tag/camouflage/> (last accessed: 08.11.2025).

14. Smit K., Lee A., Burridge M. Smoke Countermeasures for Army in the Visual and Infrared // 36th International Pyrotechnics Conference. (Rotterdam, The Netherlands, August 2009). URL: https://www.researchgate.net/publication/340684572_Smoke_Countermeasures_for_Army_in_the_Visual_and_Infrared (last accessed: 02.11.2025).

15. Smoke Operations : Field Manual FM 3-50. Washington : Department of the Army, September 11, 1996. 104 p. URL: <https://archive.org/details/fm-3-50-smoke-operations-1990/page/n1/mode/2up> (last accessed: 14.11.2025).

16. STANAG 2352. Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Equipment – Operational Guidelines. Brussels : NATO Standardization Agency, April 11, 2014. URL: <https://standards.globalspec.com/std/1678971/stanag-2352> (last accessed: 12.11.2025).

17. Command and Staff Organization and Operations : Field Manual FM 6-0. Washington : Department of the Army, May 16, 2022. 224 p. URL: https://rdl.train.army.mil/catalog-aws/view/100.ATSC/2DDE6089-23E5-4345-8E9E-7BCD5BDF45C8-1399555122246/fm6_0.pdf (last accessed: 02.11.2025).

18. Аналіз використання аерозольних (димових) засобів у сучасних бойових діях / С. С. Брянкін, Г. П. Озеран, О. В. Скиба та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2024. № 4 (22). С. 14–22. URL: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02> (дата звернення: 10.11.2025).

19. Остапчук Е. С., Абрамсон А. Н., Заплішна А. І. Актуальність аерозольного маскування в умовах сучасних бойових дій // Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво : зб. наук. праць VI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Шостка, 23–25 лист. 2022 р.). Шостка : СДУ, 2022. С. 75–79. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/90147> (дата звернення: 20.11.2025).

20. AArtyP-5. NATO Fire Support Doctrine : STANAG 2484. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), November 2015. URL: <https://www.revista-artilharia.pt/admin/upload/ficheiros/ficheirosMultimedia/aartyp-5-nato-fire-support-doctrine-stanag-2484-ed3-nov15.pdf> (last accessed: 12.11.2025).

21. STANREC 4567 (AEP-41 VOL 4). Unified Electromagnetic Environmental Effects (UE3) Susceptibility of Platforms, Systems & Equipment to E3. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), 2014. URL: <https://edstar.eda.europa.eu/Standards/Details/7f78e0bc-d49e-4434-9032-1c6697f920ad> (last accessed: 14.11.2025).

22. Kriebel D. P. Screening of New Military Materials for Toxicity and Environmental Harm. CEOBS. 2014. URL: <https://ceobs.org/screening-of-new-military-materials-for-toxicity-and-environmental-harm/> (last accessed: 02.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. STANAG 4107. (2018, November 9). *Mutual Acceptance of Government Quality Assurance and Usage of NATO Quality Assurance Publications*. NATO Standardization Office. Retrieved

from <https://ru.scribd.com/document/654191405/Aqap-4107-Eng-en-Data>

2. *Allied Joint Publication (AJP) 3.15. Allied Joint Doctrine for Countering Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Threats.* (2018, February). NATO Standardization Office. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/686715/doctrine_nato_countering_ied_ajp_3_15.pdf

3. *Allied Joint Publication (AJP) 3.20. Allied joint doctrine for force protection.* (2020, January). NATO Standardization Office. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f086ec4d3bf7f2bef137675/doctrine_nato_cyberspace_operations_ajp_3_20_1_.pdf

4. *PAA Analysis in Severely Restricted Terrain.* (2024, January). Kansa : Center for Army Lessons Learned. No. 24-846. Retrieved from <https://api.army.mil/e2/c/downloads/2024/01/25/a8b49a1b/24-846-paa-analysis-jan-22-public.pdf>

5. Meshcheriakov, I. S. (2023). Udoskonalena metodyka otsiniuvannia efektyvnosti posylennia zakhystu viisk iz zastosuvanniam aeroliziv [Improved Methodology for Assessing the Effectiveness of Strengthening the Protection of Troops Using Aerosols]. *Trudy universytetu [University Proceedings]*, 1 (176), 50–65. Kyiv [in Ukrainian].

6. Tantsiura, I., Klimov, O., Stakhovskyi, O., & Huzenko, S. (2024). Porivnialnyi analiz zasobiv aeroliznoho maskuvannia, yaki znakhodiatsia na ozbroienni u Zbroinykh Sylakh Ukrainy ta armii zakhidnykh krain-partneriv [Comparative Analysis of Aerosol Camouflage Means in Service with the Armed Forces of Ukraine and the Armies of Western Partner Countries]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk [Military-Technical Collection]*, 30, 8–13. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13> [in Ukrainian].

7. Pysariev, A. V., Lazutskyi, A. F., Tuzikov, S. A., & Pysariev, S. A. (2019). Analiz faktoriv, shcho vplyvaiut na vyznachennia dalnosti vydymosti ob'ektiv kriz aeroliznu zavisu [Analysis of Factors Affecting the Determination of the Visibility Range of Objects Through an Aerosol Curtain]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Collection of Scientific Works of the Kharkiv National University of the Air Force]*, 3 (61), 18–23. Kharkiv. Retrieved from <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/issue/archive/2> [in Ukrainian].

8. Korytchenko, K. V., Tantsiura, I. I., Klimov, O. P., & Stakhovskyi, O. V. (2021). Analiz zasobiv aeroliznoi protydii Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy [Analysis of Aerosol Countermeasures of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine]. *Mekhanika ta mashynobuduvannia [Mechanics and Mechanical Engineering]*, 2, 26–30. Kharkiv [in Ukrainian].

9. Nekrasov, S. S., Dovhopolov, A. Yu., & Kolesnyk, V. O., et al (2024). Rozrobka napivavtomatychnoi systemy aeroliznoho maskuvannia dlia ne spetsializovanoho viiskovoho ta evakuatsiinoho transportu [Development of a Semi-Automatic Aerosol Masking System for Non-Specialized Military and Evacuation Transport]. *Metody ta Prylady Kontroliu Yakosti [Methods and Devices for Quality Control]*, 2 (53), 94–104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104) [in Ukrainian].

10. Pasichnyk, V. (2025). Aerolizne maskuvannia: yak viiskovi vykorystovuiut “dymovi zavisy” na fronti [Aerosol Camouflage: How the Military Uses “Smoke Screens” on the Front]. *Gvara Media*. Retrieved from <https://gwaramedia.com/aerolizne-maskuvannya-yak-vijskovi-vikoristovuyut-dymovi-zavisi-na-fronti/> [in Ukrainian].

11. Puhach, V. V., Chepurnyi, V. P., & Kurtov, A. I., et al. (2022). *Maskuvannia viisk ta ob'ektiv. Zakhyst vid vysokotochnoi zbroi: navch. posib. [Camouflage of Troops and Objects. Protection Against High-Precision Weapons: training manual]*. Kharkiv. Retrieved from https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/maskuvannia_viisk.pdf [in Ukrainian].
12. Poriadok vykorystannia zasobiv aerzolnoho maskuvannia [Procedure for Using Aerosol Masking Agents]. *Sprotyv G7 [Resistance G7]*. Retrieved from <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/poryadok-vikoristannya-zasobiv-aerzolnogo-maskuvannya> [in Ukrainian].
13. *Pre-release: Methods of Identifying and Evaluation the Camouflage and Deceptive Properties of the Military Equipment in Land Field Trials*. (July 17, 2025). Brussels: NATO Science and Technology Organization (STO). Retrieved from <https://www.sto.nato.int/document-tag/camouflage/>
14. Smit, K., Lee, A., & Burrige, M. (2009). Smoke Countermeasures for Army in the Visual and Infrared. In *36th International Pyrotechnics Conference*. (Rotterdam, The Netherlands, August 2009). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/340684572_Smoke_Countermeasures_for_Army_in_the_Visual_and_Infrared
15. *Smoke Operations: Field Manual FM 3-50*. (September 11, 1996). Washington: Department of the Army. Retrieved from <https://archive.org/details/fm-3-50-smoke-operations-1990/page/n1/mode/2up>
16. STANAG 2352. Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Equipment – Operational Guidelines. (April 11, 2014). Brussels: NATO Standardization Agency. Retrieved from <https://standards.globalspec.com/std/1678971/stanag-2352>
17. *Command and Staff Organization and Operations: Field Manual FM 6-0*. (May 16, 2022). Washington: Department of the Army. Retrieved from https://rdl.train.army.mil/catalog-aws/view/100.ATSC/2DDE6089-23E5-4345-8E9E-7BCD5BDF45C8-1399555122246/fm6_0.pdf
18. Briankin, S. S., Ozeran, H. P., & Skyba, O. V., et al. (2024). Analiz vykorystannia aerzolnykh (dymovykh) zasobiv u suchasnykh boiovykh diiakh [Analysis of the Use of Aerosol (Smoke) Agents in Modern Combat Operations]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Collection of Scientific Works of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment]*, 4 (22), 14–22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02> [in Ukrainian].
19. Ostapchuk, E. S., Abramson, A. N., & Zaplishna, A. I. (2022). Aktualnist aerzolnoho maskuvannia v umovakh suchasnykh boiovykh dii [The Relevance of Aerosol Camouflage in Modern Combat Operations]. In *Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo: zb. nauk. prats VI Mizhnar. nauk.-prakt. konf. [Chemical Technology: Science, Economics and Production: Proceedings of the VI International Scientific Conference]*. Shostka, November 23–25, 2022. (pp. 75–79). Shostka. Retrieved from <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/90147> [in Ukrainian].
20. AArtyP-5. *NATO Fire Support Doctrine: STANAG 2484*. (November 2015). Brussels : NATO Standardization Office (NSO). Retrieved from <https://www.revista-artilharia.pt/admin/upload/ficheiros/ficheirosMultimedia/aartyp-5-nato-fire-support-doctrine-stanag-2484-ed3-nov15.pdf>

21. STANREC 4567 (AEP-41 VOL 4). *Unified Electromagnetic Environmental Effects (UE3). Susceptibility of Platforms, Systems & Equipment to E3.* (2014). Brussels: NATO Standardization Office (NSO). Retrieved from <https://edstar.eda.europa.eu/Standards/Details/7f78e0bc-d49e-4434-9032-1c6697f920ad>
22. Kriebel, D. P. (2014). *Screening of New Military Materials for Toxicity and Environmental Harm.* CE OBS. Retrieved from <https://ceobs.org/screening-of-new-military-materials-for-toxicity-and-environmental-harm/>

B. I. Tertyshnyi, A. A. Nikitin, I. S. Meshcheriakov, O. M. Sampir, A. G. Kenherli
MODEL OF APPLICATION OF AEROSOL CAMOUFLAGE UNITS IN OFFENSIVE OPERATIONS ACCORDING TO NATO STANDARDS

Offensive operations of modern troops are characterized by high dynamics, rapid changes in forms and methods of combat, the need to disorganize enemy control systems and create an advantage in the chosen direction. According to NATO approaches, aerosol camouflage is considered not as an auxiliary means, but as an integrated support element capable of ensuring stealth, surprise and maneuverability of forces at all stages of the offensive, as well as ensuring continuity and pace of offensive operations.

Taking into account the modern threats of the use of high-precision weapons, UAVs and enemy guidance means, there is a problem of the lack of a holistic, adaptive model capable of describing the optimal methods of using aerosol camouflage in offensive operations taking into account NATO standards. Traditional approaches are mostly focused on static or partially dynamic scenarios that do not reflect the realities of high-speed offensive operations.

The proposed Model for the use of aerosol camouflage units in an offensive forms a holistic structure for the use of aerosol camouflage units, covering the tactical aspects of the use of aerosols, including concealment of maneuver, misleading the enemy, masking the creation of passages, defeating enemy reconnaissance assets and supporting fire actions.

The developed Model is a dynamic, adaptive and multi-modular system that meets NATO standards and ensures the effective use of aerosol means in a wide range of offensive actions. It integrates theoretical provisions, tactical requirements and mathematical dependencies into a comprehensive planning and management tool.

Keywords: *offensive; aerosol camouflage; model; risk; protection; effectiveness.*

Ю. П. Гончаренко, І. І. Полещук, О. Ф. Соколовський, В. А. Яковенко

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ СТВОРЕННЯ БЮДЖЕТНОГО ІОНОЗОНДА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У статті надано обґрунтування створення сучасного іонозонда, інформація якого може використовуватися для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистем, а також із метою мінімізації ризиків, пов'язаних із впливом атмосферних явищ на електричну інфраструктуру. Характеристики розробленого іонозонда не поступаються сучасним виробам провідних країн світу.

Проаналізовано наявні іонозонди, їх технічні характеристики. Запропоновано метод формування синтезованого лінійно-частотно-модульованого сигналу та його оптимальної фільтрації, проведено дослідження щодо можливості його застосування в радіолокаційній станції вертикального зондування іоносфери. Крім того, обґрунтовано склад апаратно-програмного комплексу частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням лінійно-частотно-модульованих сигналів. Цей комплекс побудовано на основі універсальної платформи USRP N210, яка дозволяє використовувати приймачі та передавачі за технологією SDR у діапазоні частот до 6 ГГц. Такий широкий частотний діапазон може забезпечуватися змінними дочірніми платами.

На основі проведеного аналізу запропоновано розробку іонозонда, вартість виготовлення якого значно менша, ніж аналогів провідних світових виробників радіолокаційній станції вертикального зондування, а деякі технічні характеристики навіть значно кращі. Для порівняння розробленого та сучасних іонозондів були вибрані такі основні параметри: еквівалентна потужність випромінювання та спектр сигналу, який випромінюється.

На базі результатів проведених досліджень визначено вимоги та основні технічні характеристики, яким повинен відповідати ідеальний іонозонд.

Ключові слова: енергосистема; іонозонд; радіолокаційна станція вертикального зондування; синтезований лінійно-частотно-модульований сигнал; оптимальна фільтрація.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У наш час іоносфера відіграє значну роль у передачі електроенергії лініями електропередач, її вплив можна охарактеризувати кількома ключовими аспектами [1–4]:

1. Іоносфера, що містить іонізований газ, може суттєво впливати на передавання електромагнітних хвиль. Це особливо актуально для частот, що використовуються у високовольтних лініях електропередач. Перешкоди з боку іоносфери можуть бути більш вираженими, ніж від самих ліній електропередач.

2. В іоносфері є електричні поля, які можуть взаємодіяти зі струмами, що проходять лініями електропередач. Ця взаємодія може призводити до змін у силі та напрямку електричних полів, що впливає на стабільність та ефективність передачі енергії.

3. Геофізичні збурення: такі геліогеофізичні активності, як сонячна погода та магнітні бурі, можуть викликати безпосередні зміни в стані іоносфери, що відображається на якості й надійності передачі електричної енергії.

4. Розповсюдження радіохвиль: іоносфера впливає не лише на проводи, але й на радіохвилі, які навколо ліній електропередач можуть як посилюватися, так і послаблюватися відповідно до її стану. Це також може впливати на системи зв'язку, підключені до ліній електропередач.

Отже, вплив іоносфери на лінії електропередач багатогранний і може бути як позитивним, так і негативним залежно від поточних умов в атмосфері та іоносфері.

Згідно з викладеним для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистем, а також для мінімізації ризиків, пов'язаних з впливом атмосферних явищ на електричну інфраструктуру, виникає потреба в зондуванні іоносфери.

Відомі різні методи зондування іоносфери, кожен із яких має свої особливості та сфери застосування. Основні методи включають [1, 4]:

іонозонди, які вимірюють профілі електронної концентрації іоносфери на різних висотах. Вони використовують радіохвилі для зондування, відправляючи сигнали та фіксуючи відбиття від іоносферних шарів, що дозволяє отримати дані про розподіл іонів та електронів;

вертикальне зондування, що базується на відправленні радіосигналів вертикально вгору та аналізі отриманих відбиттів. Цей метод застосовують для створення профілів іоносферних шарів та вивчення їх змін залежно від часу доби та сонячної активності;

використання сигналів від супутників глобальної навігаційної супутникової системи дозволяє отримувати дані про стан іоносфери. Ці системи допомагають оцінювати вплив іоносфери на розповсюдження радіохвиль, а також визначати загальний електронний вміст;

радіолокаційні технології застосовують для вивчення динамічних процесів в іоносфері, а також для дослідження її структури на різних висотах, вони можуть бути використані радары когерентного та некогерентного розсіювання. Когерентні радары дозволяють отримувати високу роздільну здатність, а некогерентні можуть оцінювати швидкість руху іоносферних неоднорідностей;

радіометрію використовують для вивчення іоносферного розповсюдження радіохвиль та вимірювання рівня іоносферної активності в певних частотних діапазонах;

математичне моделювання іоносферних процесів допомагає прогнозувати та аналізувати стан іоносфери на основі даних про сонячну активність та гамма-випромінювання.

Кожен із цих методів відіграє важливу роль у вивченні іоносфери, дозволяючи вченим оцінювати її стан, а також розуміти, як вона взаємодіє із сонячним випромінюванням та іншими зовнішніми впливами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За 90 років від початку досліджень іоносфери (Appleton, Barnet (1925); Breit, Tuve (1926)) накопичено величезний експериментальний матеріал, стала зрозумілою фізика основних явищ в іоносфері. Вдалося, з одного боку, з'ясувати її загальні властивості й особливості на різних широтах, її поведінку залежно від часу доби та сезону, а з іншого боку – стала очевидною надзвичайна складність нерегулярних процесів, які відбуваються в іоносфері. В останні десятиліття досліджено механізми впливу земних і наземних процесів (землетрусу, метеорологічних явищ тощо) на стан іоносфери. Роботи з прогнозування стану іоносфери щодо пошуку зв'язку іоносферних явищ із процесами в магнітосфері Землі і в навколосферному просторі вимагають нових, більш детальних і точних експериментальних даних. Вони є основою для розрахунку іоносферних ліній зв'язку, для оцінювання працездатності різних комплексів апаратури, що функціонують на основі іоносферних радіохвиль.

На сьогоднішній день на території України немає станції вертикального зондування іоносфери (ВЗІ), яка регулярно працює. Дослідницьке устаткування, наявне в обсерваторіях Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна та Інституту іоносфери Національної академії наук України, морально і фізично застаріло, його не можливо застосовувати в безперервному режимі для діагностики іоносфери.

Єдиний штатний іонозонд IPS-42 (австралійського виробництва, 1982 р. випуску) регулярно працює в режимі 15-хвилинного зондування. Він функціонує на Українській антарктичній станції (УАС) «Академік Вернадський», хоча давно застарів і в процесі експлуатації регулярно потребує ремонту.

Найближчі до території України сучасні станції ВЗІ знаходяться на великих відстанях (близько 1000 км) у Празі та Москві.

З огляду на активні українські наземно-космічні програми і перспективні проєкти з дослідження геокосмосу, розвитку супутникових технологій у сфері навігації, зв'язку й інформації, назріла необхідність створення національних установок зондування іоносфери.

На жаль, сьогодні жодне з відомств України, яке зацікавлене в інформації про іоносферу, не має фінансових ресурсів для придбання хоча б одного сучасного іонозона, оскільки його вартість становить понад 200 тис. доларів США [6].

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є аналіз сучасних іонозондів, зокрема їх технічних характеристик, обґрунтування розроблення способу створення синтезованого лінійно-частотно-модульованого (ЛЧМ) сигналу та його оптимальної фільтрації, а також структури сучасного іонозона. Синтезований ЛЧМ-сигнал за своїми параметрами може бути альтернативою для сучасних радіолокаційних станцій (РЛС) вертикального зондування, а за характеристиками він не поступається сучасним виробам провідних країн світу.

Виклад основного матеріалу. Техніка вертикального зондування постійно вдосконалюється. На зміну іонозонам із кіловатними потужностями приходять компактні малопотужні пристрої на основі складних сигналів. Вони є зручними для іоносферного

забезпечення систем зв'язку та коригування моделі іоносфери в заданому регіоні за реальними даними. Відповідно, ВЗІ на сьогодні залишається основним методом збору інформації про неї. За допомогою станцій вертикального зондування можна отримати відомості про всі зміни електронної концентрації, що відбуваються в іоносфері, тому функціонує опорна мережа таких станцій ВЗІ, дані з яких узагальнюються у відомих емпіричних моделях типу IRI. Розглянемо деякі з них.

Блок-схему сучасної станції вертикального зондування «Вектор» наведено на рис. 1.

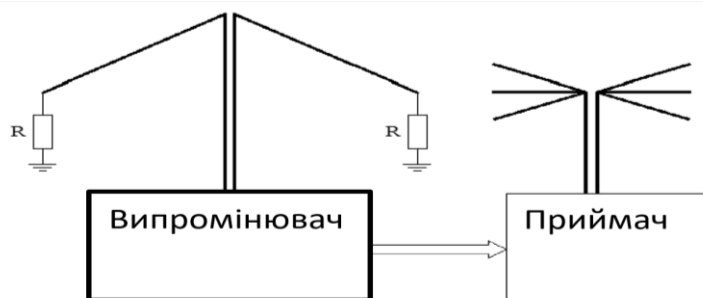


Рис. 1. Блок-схема станції вертикального зондування «Вектор»

Вона містить передавальну і приймальну антени, випромінювач і приймач. Передавальна антена типу антени біжучої хвилі «Дельта» з вертикальною пелюсткою діаграми спрямованості. Вона встановлена на даху будівлі Балтійського федерального університету імені Еммануїла Канта та працює в широкому діапазоні частот. За приймальну антену використовуються два напівхвильові вібратори, доповнені конструктивними елементами до конічних вібраторів для розширення частотного діапазону. Два конічні вібратори розташовані перпендикулярно один до одного для приймання еліптично поляризованих хвиль, відбитих від іоносфери. На антену подається сигнал із амплітудою 400 В. Приймач приймає радіосигнали, відбиті від іоносфери, підсилює їх і перетворює за частотою. Проміжна частота приймача дорівнює 215 КГц. Випромінювач (рис. 1) випромінює M -послідовність радіоімпульсів (рис. 2). Тривалість однієї позиції становить 30 мкс, а M -послідовності $T = 480$ мкс. Інтервал між відліками $\Delta t = 0,2$ мкс, між випромінюванням послідовностями — 6 мс. Цього достатньо, щоб радіохвилі навіть тричі відбилися від іоносфери. Робоча частота змінюється дискретно від 1 МГц до 9 МГц.

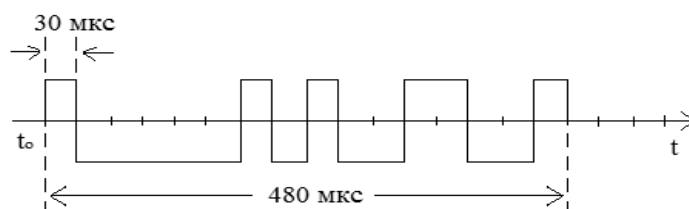


Рис. 2. M -послідовність радіоімпульсів

Вихідну M -послідовність, прийняту приймачем у момент випромінювання, тривалістю однієї позиції 30 мкс, один відлік якої дорівнює 0,2 мкс, показано на рис. 3.

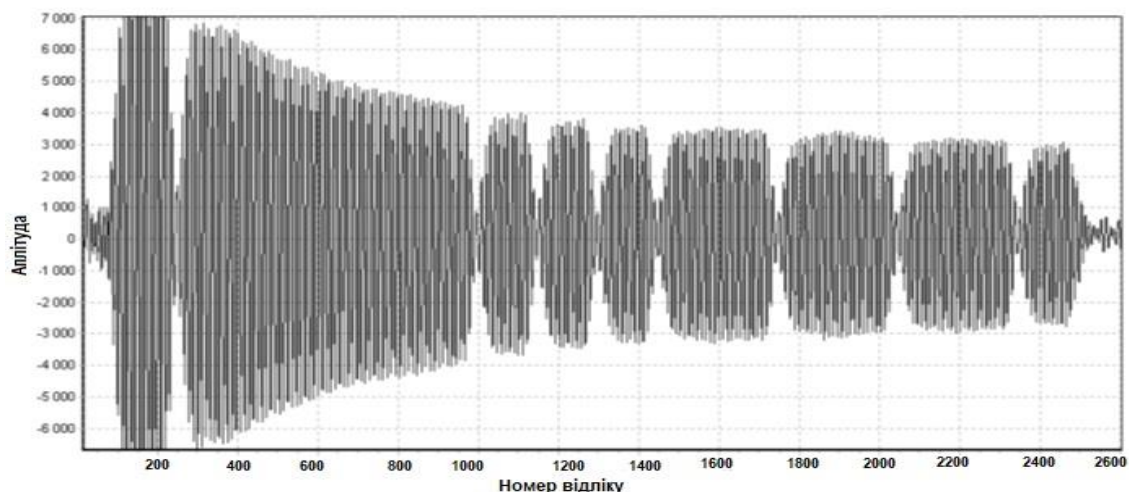


Рис. 3. Структура вихідного сигналу – 16-позиційна M -послідовність

На рис. 4 наведено вихідне повідомлення, отримане на одній частоті, тривалістю 6 мс без оброблення. Такі повідомлення приймаються приймачем на фіксованій частоті. На цій самій частоті приймається і перешкода.

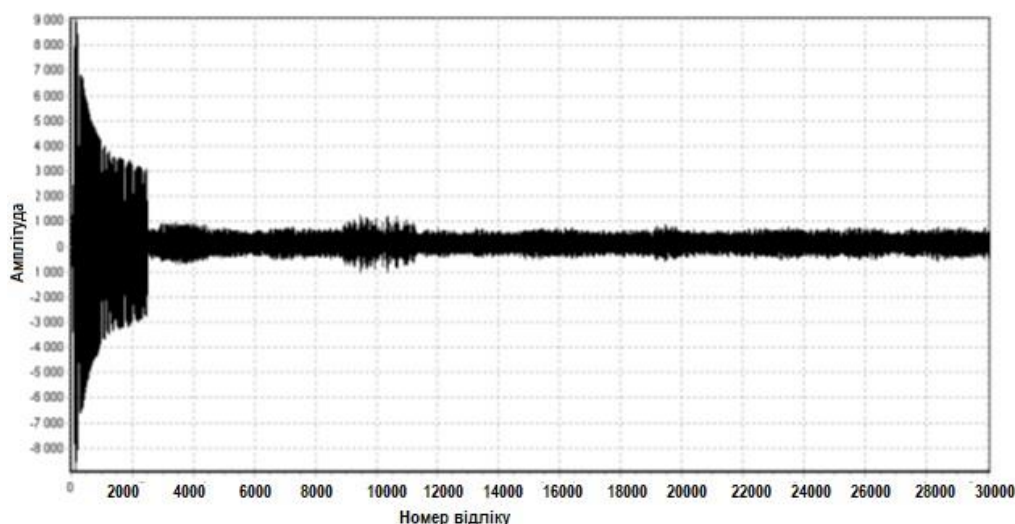


Рис. 4. Відбитий сигнал на виході приймача пристрою вертикального зондування іоносфери (без оброблення)

У результаті кореляційного оброблення (рис. 5) перешкода практично зникає. Кореляційна функція випромінюваної M -послідовності в максимумі досягає значення 1200.

Розглянемо **економічний портативний когерентний іонозонд на базі технології програмного радіо** (Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, м. Харків). Він дозволяє проводити іоносферну діагностику в безперервному режимі й не вимагає великих фінансових витрат. Найближчими цілями для його практичного використання є експлуатація на УАС «Академік Вернадський», а також оснащення аналогічним устаткуванням декількох обсерваторій в Україні для створення системи підсупутникового іоносферного моніторингу та інформаційного забезпечення Центру прогнозування космічної погоди.

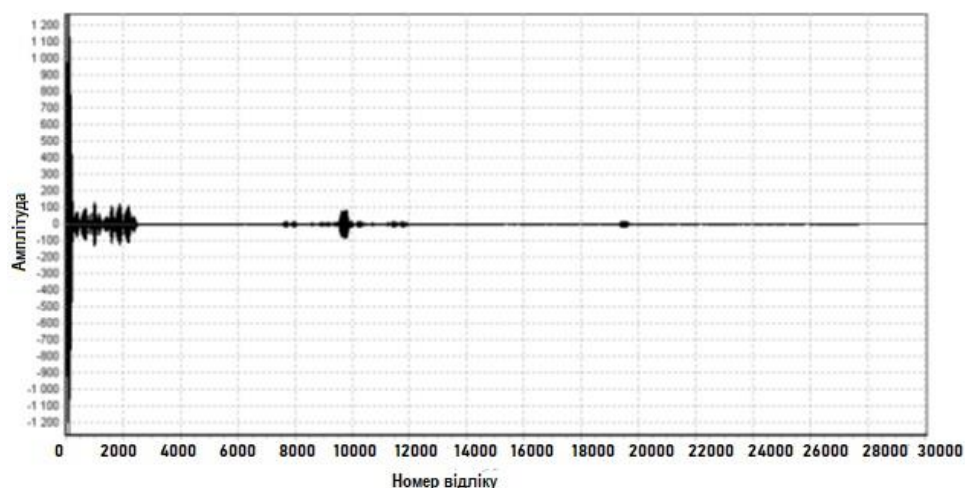


Рис. 5. Структура сигналу після кореляційного оброблення

Слід зауважити, що принцип побудови іонозонда ґрунтується на ідеях, закладених у конструкцію аналогічних сучасних пристроїв, зокрема іонозонда DPS4 [8], а також на використанні технології програмного радіо SDR (Software Defined Radio) для іоносферного зондування.

Основною відмінністю цього комплексу від розроблених раніше аналогів є застосування зв'язкового передавача порівняно малої потужності. Функціонально іонозонд складається з керувального комп'ютера (ПК), програмного радіо USRP N200 KIT (Universal Software Radio Peripheral) [9], антенного комутатора ZX80-DR230+ [https://ww2.minicircuits.com/pdfs/ZX80-DR230+.pdf] і трансивера ICOM-IC-718 [5] із блоком живлення SP-200-13,5 (рис. 6).

Його технічні характеристики: діапазон робочих частот – 1,6–30 МГц; діапазон вимірювальних висот – 90–825 км; роздільна здатність за висотою – 1,4 км; максимальна потужність випромінювання передавача в імпульсі – 100 Вт; фіксована довжина однієї кодової послідовності – 0,6 мс; кількість елементарних субімпульсів – від 4 до 64; в одній кодовій послідовності відзначається зростання ($2n$, $n = 2 \dots 6$); кількість кодових посилок на одній частоті в режимі іонозонда – від 1 до 250.

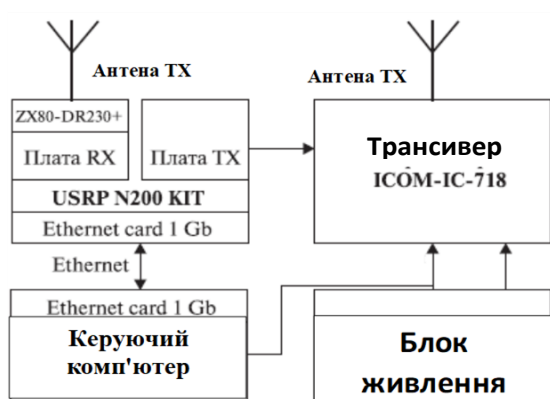


Рис. 6. Блок-схема макета іонозонда

Як видно з рис. 6, для виконання зондувань потрібно дві антени: приймальна та передавальна. На практиці можуть використовуватися антени різних типів із робочою смугою частот 1,6–30 МГц. Для передавальної антени споживання енергії має бути більше ніж 100 Вт, а коефіцієнт стоячої хвилі в антенно-фідерному тракті не повинен перевищувати 2,5.

Пристрій функціонує таким чином: у керувальному ПК на кожній частоті зондування формуються пробні імпульси, що складаються з послідовності фазоманіпульованих субімпульсів («chirps»). Для генерації субімпульсів використовуються комплементарні коди [4], які забезпечують необхідний висотний дозвіл відповідно до довжини одного субімпульсу. Таке кодування покращує співвідношення сигнал/шум пропорційно кількості субімпульсів коду. У програмному радіо USRP за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) ця послідовність перетворюється в аналоговий сигнал, посилюється до необхідного рівня на платі TX і після посилення трансивером ICOM подається на передавальну антену. Відбитий від іоносфери сигнал надходить на приймальну антену, а з неї – на приймальну плату RX пристрою USRP, де він посилюється до рівня вхідної напруги аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Після перетворення в цифру прийнятий сигнал надходить до ПК, який виконує такі функції: управління програмним радіо, формування й оброблення сигналів, відображення та збирання даних, їх зберігання, а також аналіз.

Портативний цифровий іонозонд DPS-4 – система, що складається з іонозонда та чотирьох приймальних антен, відрізняється від своїх попередніх аналогів тим, що має передавач малої потужності (300 Вт проти 10 кВт для попередніх своїх прототипів). Синхронізація часу проводиться через систему глобального позиціонування GPS. Загальний вигляд DPS-4 показано на рис. 7, а його передавальної та приймальної антен DPS-4 – на рис. 8.



Рис. 7. Загальний вигляд DPS-4

Для випромінювання радіосигналів використовується антенна система у вигляді схрещеного вертикального ромба для короткохвильового (КХ) діапазону та чотирьох поперечних приймальних антен типу магнітний диполь.

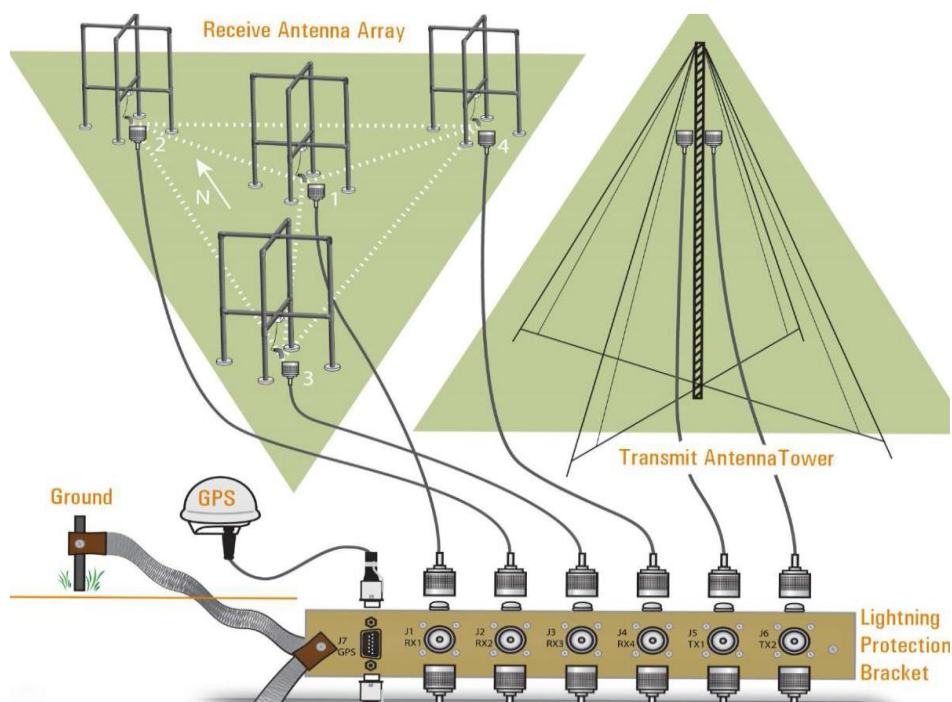


Рис. 8. Загальний вигляд передавальної та приймальної антен DPS-4

Короткий опис цифрової іоносферної станції DPS-41: частотний діапазон випромінювання – 1–30 МГц; потужність випромінювання передавача – 300 Вт; тривалість зондувального імпульсу – 533 мкс; частота проходження імпульсів – 50–100–200 Гц залежно від вибору програми; частотний крок зондування – від 5 кГц до 200 кГц залежно від вибору програми; висотний діапазон – 640 км і 1280 км залежно від вибору програми; габарити – 721 мм x 584 мм x 483 мм; вага – 60 кг.

Отже, система DPS-4 – приймально-передавальний комплекс, здатний контролювати в реальному часі характеристики фізичних властивостей іоносфери й електричні властивості радіосигналів, що розповсюджуються в ній.

Завдяки встановленій у ПК іонозонда мережевій карті можливим є програмно передбачений віддалений контроль та управління станом іонозонда, а також вихід в Інтернет. Відповідно, DPS-4 автоматично може передавати дані вимірювань у світові центри даних, зацікавленим установам та приватним особам тощо. Прямий доступ до управління і даних іонозонда можливий лише з дозволу адміністратора мережі.

Запропоновано **апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням ЛЧМ-сигналів**, побудований на основі універсальної платформи USRP N210, яка дозволяє використовувати приймачі та передавачі за технологією SDR у діапазоні частот до 6 ГГц. Такий широкий частотний діапазон забезпечується змінними дочірніми платами. Оскільки нас цікавить декаметровий діапазон, то як дочірні плати були вибрані LFTX і LFRX, які забезпечують передавання та приймання сигналів у діапазоні до 30 МГц. Основу приймального тракту пристрою становить 14-бітний АЦП, який працює на швидкості 100 MS / s, що дозволяє приймати радіосигнали до 50 МГц без попереднього перетворення. Інфрачервоний промінь формується за допомогою 16-бітного ЦАП і працює на швидкості 400 MS / s.

Структурну схему комплексу наведено на рис. 9. Комплексний ЛЧМ-сигнал для випромінювання формується в ПК. Далі він надходить в універсальну апаратну платформу (USRP), де переноситься на робочу частоту за допомогою цифрового перетворювача вгору (DUC) і перетворюється в аналогову форму (ЦАП). Після підсилювача потужності через комутатор, який управляється функцією, що переключає, сигнал надходить в антену. Відбитий від іоносфери сигнал приймається тією ж антеною і через комутатор надходить в універсальну апаратну платформу (USRP), що реалізує приймач. Тут прийнятий сигнал відразу перетворюється в цифрову форму (АЦП). Далі цифровий понижувальний конвертер (DDC) здійснює вибірку спектра необхідної смуги і передає його в ПК для оброблення в комплексному вигляді. На першому етапі оброблення сигналу полягає в стисненні прийнятого ЛЧМ-сигналу і записі його у файл. Стиснення ЛЧМ-сигналу здійснюється в демодуляторі шляхом перемноження прийнятого сигналу з аналітичним ЛЧМ-сигналом. Далі обчислюється висотно-частотна характеристика (іонограми) і визначаються параметри каналу.

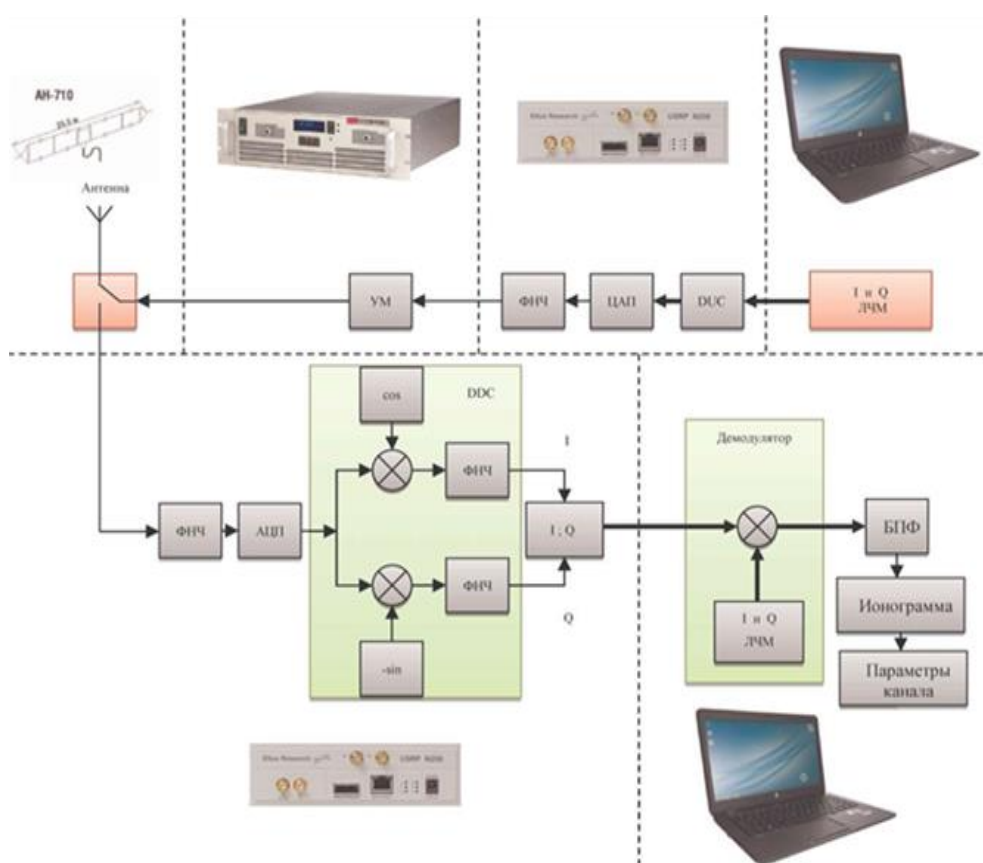


Рис. 9. Структурна схема апаратно-програмного комплексу частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку

Основні технічні характеристики комплексу: діапазон робочих частот – 2–20 МГц; швидкість сканування (зміни) частоти – 50 кГц / с; діапазон висот – 90–1000 км; потужність випромінювання – 5–10 Вт; роздільна здатність за частотою іоносферного каналу – 20,5 кГц; роздільна здатність за часом групового запізнення – 58 мкс.

Зовнішній вигляд комплексу наведено на рис. 10.

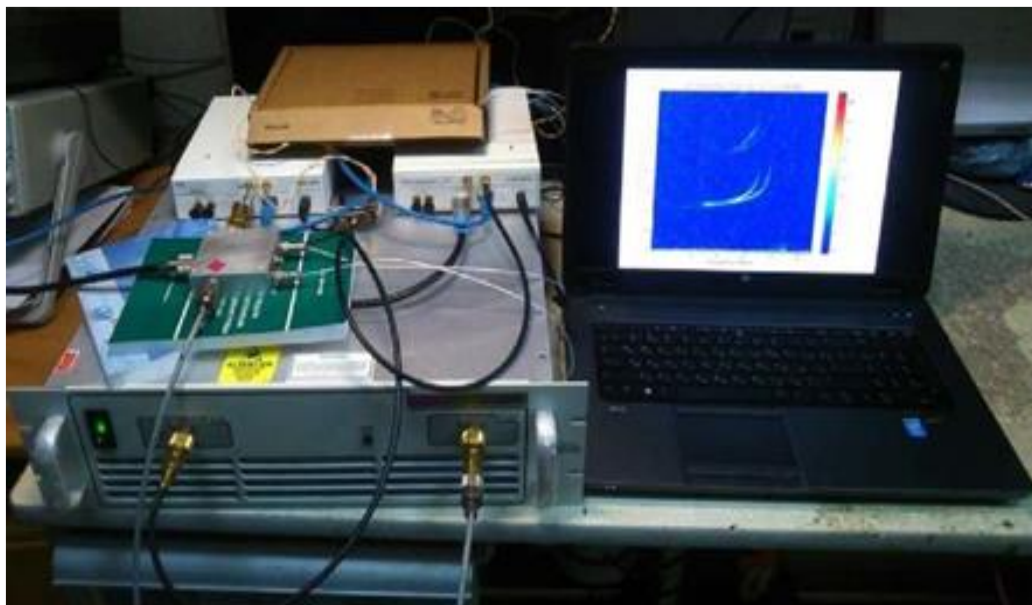


Рис. 10. Апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку

Для роботи на одну приймально-передавальну антену в однопозиційному ЛЧМ-іонозонді використовується антенний перемикач, який блокуватиме вхід приймача на час передавання сигналу та відключатиме сигнал від передавача під час приймання відбитого сигналу. Для забезпечення коротких імпульсів (більше 600 мкс) перемикач повинен мати високу швидкість перемикання, що робить неможливим застосування механічних перемикачів на реле, тому як керувальні елементи використані р-і-п діоди UM904A. Схема складається із самого комутатора на р-і-п діодах і формувача керувальної напруги (драйвера). Генератор керувальної функції формує тимчасові інтервали керувальних імпульсів стандартних логічних рівнів. Потім драйвер перетворює ці рівні напруги в двополярні прямокутні імпульси рівнів $-25 / +25$ В. Перемикач забезпечує час перемикання 12 мкс. З огляду на цю особливість керувальний сигнал був скоригований шляхом додавання захисних інтервалів у керувальну функцію під час формування високочастотного сигналу. При цьому тривалість кожного переданого імпульсу зменшується на 24 мкс.

Підсилювач радіосигналів 5084F OPHIR RF підсилює сигнал із виходу USRP. Для випромінювання і приймання сигналу використовується антена типу горизонтальний диполь Icom AH-710.

Основні характеристики: діапазон робочих частот – 1,9–30 МГц; фізична довжина антени в робочому стані (розмах) – 24,5 м.

Сигнал для зондування формується програмою LFSR Transmitter. Тут синтезується ЛЧМ-сигнал, який використовується для діагностування, а також керувальний сигнал для антенного комутатора передавача однопозиційного іонозонда, побудованого на універсальній платформі USRP. Керувальний сигнал комутації має форму прямокутних імпульсів, що відповідають послідовності перемикання. Цей сигнал генерується в передавальному USRP за допомогою цифрових портів введення-виведення, якими

управляють із ПК. ЛЧМ-сигнал синтезується у вигляді комплексної обвідної. Для генерації зондувального ЛЧМ-сигналу і сигналів, синхронізованих за часом, використовують вбудований у USRP модуль GPS. Це дозволяє виключити з передавального сигналу тимчасові інтервали, відведені на прийом, і накласти на фронти сигналу вагові функції. Для зменшення несмугового випромінювання на імпульси накладаються вагові функції.

Оброблення сигналу здійснюється в програмі dsChirp. Тут проводиться стиснення сигналу, побудова іонограми та їх очищення від станційних шумів методом медіальної фільтрації. Синхронізація за часом забезпечується вбудованим в USRP модулем GPS. Інтерфейс програми наведено на рис. 11.

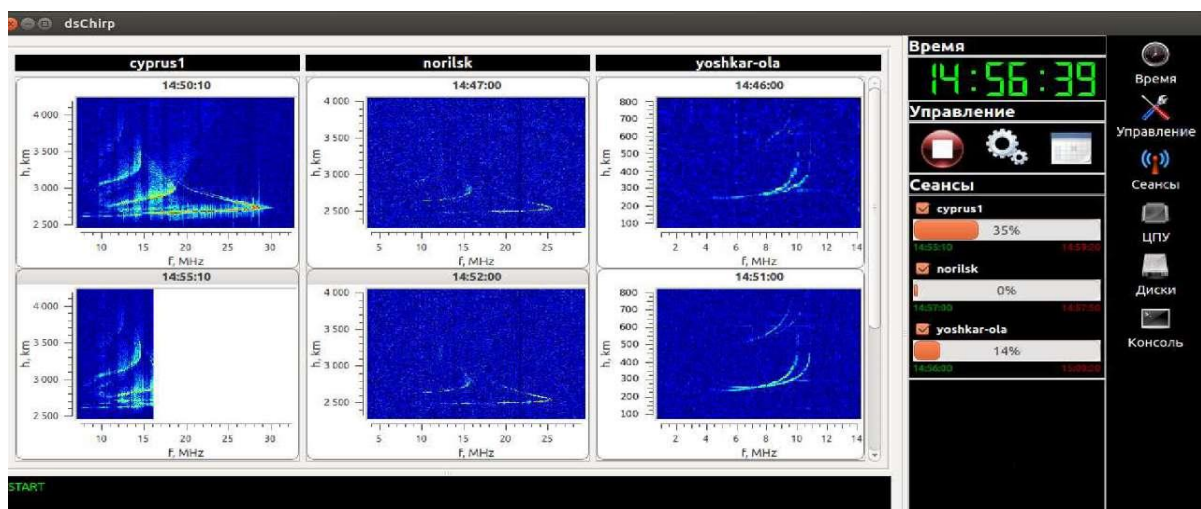


Рис. 11. Інтерфейс програми dsChirp

Для **порівняльного аналізу** сучасних іонозондів візьмемо основні параметри, а саме: еквівалентну потужність випромінювання P_e і спектр сигналу який випромінюється F_c .

Потужність випромінювання сигналу визначає: енергетичні витрати, відношення сигнал / шум, габарити й вагу виробу, розміри та технічні характеристики антен, електромагнітну сумісність із сусідніми радіоелектронними пристроями тощо. Для нівелювання взаємовиключних вимог застосовують широкосмугові сигнали з великою базою, які дозволяють зменшити потужність випромінювання сигналу в базу раз. Тоді еквівалентна потужність випромінювання – це необхідна потужність випромінювання пристрою, який використовує вузькосмуговий сигнал для досягнення таких самих технічних характеристик, що і пристрій із використанням широкосмугових сигналів.

В іоносферному КХ-каналі має місце ефект частотної дисперсії, який із перевищенням смугою сигналу деякої величини (смуги когерентності каналу) призводить до сильного спотворення форми його обвідної [5]). Гранична смуга частотного спектра елемента сигналу не повинна перевищувати ~ 30 кГц. Величиною цієї смуги в ході зондування іоносфери визначається роздільна здатність за висотою відображення, а в разі зондування радіоканалу – точність оцінки розсіювання за затримкою.

Станція вертикального зондування «Вектор» подає на антену сигнал з амплітудою $U_a = 400$ В. Якщо опір антени $R_a = 50$ Ом, то потужність, яка передається антені дорівнює

$$P_a = I \cdot (U_a/2) = U_a^2/2R = 1600 \text{ Вт.}$$

Випромінювач випромінює M -послідовність радіоімпульсів. Тривалість однієї позиції $T_n = 30$ мкс. Тривалість M -послідовності $T = 480$ мкс. Тоді база сигналу, який випромінюється, $B = 16$. Еквівалентна потужність пристрою дорівнює

$$P_e = P_a \cdot B = 25,6 \text{ кВт.}$$

Спектр сигналу дорівнює спектру сигналу однієї позиції, а саме:

$$F_c = 1/N_n = 33,3 \text{ кГц.}$$

Економічний портативний когерентний іонозонд на базі технології програмного радіо (Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, м. Харків). Використовуючи такі дані: максимальну потужність випромінювання передавача в імпульсі – 100 Вт; фіксовану довжину однієї кодової послілки – 0,6; кількість елементарних субімпульсів – від 4 до 64, – отримаємо: еквівалентну потужність пристрою $P_e = 6,4$ кВт; спектр сигналу, який випромінюється, – $F_c = 106,66$ кГц.

Портативний цифровий іонозонд DPS-4 має 16 субімпульсів у зондувальному сигналі, тоді еквівалентна потужність пристрою дорівнює $P_e = 4,8$ кВт (з урахуванням антени для приймання $P_e > 16$ кВт); спектр сигналу, який випромінюється, $F_c = 30$ кГц.

Апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням ЛЧМ-сигналів має такі характеристики: еквівалентна потужність пристрою $P_e > 10$ кВт; спектр сигналу, який випромінюється, $F_c = 30$ кГц.

За своїми характеристиками портативний цифровий іонозонд DPS-4 та апаратно-програмний комплекс частотного забезпечення ближнього декаметрового зв'язку з використанням ЛЧМ-сигналів є сучасними компактними приладами з багатим функціональним наповненням.

Станція вертикального зондування «Вектор» – це сучасний прилад, проте він використовує значну потужність – 1,6 кВт, що є недоліком. Крім того, потрібно враховувати електромагнітну сумісність із навколишніми радіоелектронними засобами.

Економічний портативний когерентний іонозонд на базі технології програмного радіо (Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, м. Харків) також має деякі сумнівні характеристики іонозонда, оскільки під час його розроблення не були враховані дисперсійні властивості іоносфери. Спектр сигналу перевищує допустимий спектр більше ніж втричі – 103 кГц, а гранична смуга частотного спектра елемента сигналу не повинна перевищувати 30 кГц [5].

Висновки. Виходячи із зазначеного вище, ідеальний іонозонд, інформація якого буде використовуватися для підвищення надійності та ефективності роботи енергосистем, а також для мінімізації ризиків, пов'язаних із впливом атмосферних явищ на електричну інфраструктуру, повинен мати такі характеристики:

щонайменшу вихідну потужність передавача;

електромагнітну сумісність із навколишніми радіоелектронними засобами;
спектр випромінюваного сигналу F_c повинен бути не більше 30 кГц;
щонайменший час отримання необхідної інформації про стан іоносфери,
функціональність;
інформативність;
простоту реалізації та експлуатації;
надійність, мобільність, екологічність;
оптимальне відношення вартість / якість.

Для реалізації цих характеристик необхідно використовувати: широкосмугові сигнали з великою базою та їх оптимальне оброблення; сучасні антенні системи; новітні алгоритми оброблення сигналів; сучасні передавачі та приймачі радіосигналів.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Кременецький І. О., Черемних О. К. Космічна погода: механізми і прояви / За ред. О. П. Федорова. Київ : Наукова думка, 2009. 144 с
2. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы : Монография. Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 576 с.
3. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11, № 1/2. С. 37–57.
4. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія. 1999. Т. 5, № 1. С. 38–47. <https://doi.org/10.15407/knit1999.01.038>
5. Грицай А. В., Міліневський Г. П. Загальний вміст озону над станцією Київ – Голосіїв за наземними та супутниковими вимірюваннями у 2010–2015 рр. // Космічна наука і технологія. 2018. Т. 24, № 3. С. 40–54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>
6. Golay M. S. Complementary Codes // IRE Trans. Inform.Theory. April 1961. Vol. 7, № 2. P. 82–87.
7. The Digisonde Portable Sounder – DPS. Techn. Manual. / B. Reinisch et al. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007.
8. Радіостанції цифрові портативні. URL: <https://radio-product.com.ua/p298416014-icom-7200-transiver.html> (дата звернення: 10.11.2025).
9. ETTUS USRP B200 SDR трансивер. URL: <https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT> (дата звернення: 10.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. Kremenetskyi, I. O., & Cheremnykh, O. K. (2009). *Kosmichna pohoda: mekhanizmy i proiavy [Space Weather: Mechanisms and Manifestations]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Lazorenko, O. V., & Chernogor, L. F. (2009). *Sverhshirokopolosnye signaly i processy: Monografiya [Ultra-Wideband Signals and Processes: Monograph]*. Kharkiv [in russian].

3. Burmaka, V. P., Lysenko, V. N., & Chernogor, L. F. (2005). Rezultaty issledovaniya volnovykh processov v ionosfere pri razlichnykh sostoyaniyakh kosmicheskoy pogody [Results of the Study of Wave Processes in the Ionosphere under Various States of Space Weather]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space Science and Technology]*, 11, 1/2, 37–57 [in russian].
4. Chernogor, L. F. (1999). Energetika processov na Zemle, v atmosfere i okolozemnom kosmose v svete proekta «Poperedzhennya» [Energy of Processes on Earth, in the Atmosphere, and in Near-Earth Space in Light of the "Warning" project]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space Science and Technology]*, 5, 1, 38–47 [in russian].
<https://doi.org/10.15407/knit1999.01.038>
5. Hrytsai, A. V., & Milinevskiy, H. P. (2018). Zahalnyi vmist ozonu nad stantsiieiu Kyiv – Holosiiv za nazemnymy ta suputnykovymy vymiriuivanniamy u 2010–2015 rr. [Total Ozone Content over Kyiv-Goloseyev Station by Ground-Based and Satellite Measurements in 2010–2015]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space Science and Technology]*, 24, 3, 40–54.
<https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040> [in Ukrainian].
6. Golay, M. S. (April 1961). Complementary Codes. *IRE Trans. Inform.Theory*, 7, 2, 82–87.
7. Reinisch, B., et al. (2007). *The Digisonde Portable Sounder – DPS. Techn. Manual*. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research.
8. Radiostantsii tsyfrovi portatyvni [Digital Portable Radio Stations]. Retrieved from <https://radio-product.com.ua/p298416014-icom-7200-transiver.html> [in Ukrainian].
9. ETTUS USRP B200 SDR Transceiver. (n.d.). Retrieved from <https://www.ettus.com/product/details/UN200-KIT>

Yu. P. Honcharenko, I. I. Poleschchuk, O. I. Sokolovskyi, V. A. Yakovenko

JUSTIFICATION OF THE NEED TO CREATE A BUDGETARY IONOSONDE TO INCREASE THE RELIABILITY AND EFFICIENCY OF THE POWER SYSTEM

The main goal of the article is to substantiate the creation of a modern ionosonde, the information from which will be used to improve the reliability and efficiency of power systems, as well as to minimize the risks associated with the impact of atmospheric phenomena on electrical infrastructure, and whose characteristics are on par with modern products from leading countries worldwide.

An analysis of modern ionosondes and their technical characteristics has been carried out. A method for creating a synthesized chirp linear frequency modulation signal and its optimal filtering for use in vertical ionospheric sounding radar has been developed. A method and technique for generating a synthesized linear frequency modulation signal have been developed, and some studies have been conducted regarding the possibility of using this signal in vertical ionospheric sounding radar. The composition of a hardware-software complex for frequency support of short-range HF communication using linear frequency modulation signals is substantiated. The hardware-software complex for frequency support of short-range HF communication is built on the basis of the universal USRP N210 platform. This platform allows the use of receivers and transmitters based on SDR (Software Defined Radio) technology in the frequency range up to 6 GHz. Such a wide frequency range can be provided by interchangeable daughterboards.

Based on the analysis carried out, the development of an ionosonde is proposed, the manufacturing cost of which is significantly lower than that of similar products from global vertical ionospheric sounding radar manufacturers, while some technical characteristics are significantly better. For a comparative analysis of the proposed and modern ionosondes, the following main parameters were selected for comparison, namely the equivalent radiated power and the spectrum of the emitted signal.

Based on the research carried out, the requirements and basic technical characteristics that an ideal ionosonde should meet are determined.

Keywords: *energy system, ionosonde, radar systems for vertical sounding, synthesized linear frequency modulation signal; optimal filtering.*

Ю. Л. Бондаренко, І. А. Іщенко

АНАЛІЗ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ РОЗВІДУВАЛЬНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ І КЛАСУ

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності систем електроживлення безпілотних літальних апаратів, зокрема досліджено взаємодію джерел живлення, електронних регуляторів швидкості та безколекторних електродвигунів. Проаналізовано структуру типової енергетичної системи безпілотних літальних апаратів, включно з акумуляторами, модулями розподілу живлення, політним контролером та силовими перетворювачами. Особливу увагу приділено характеристикам безколекторних електродвигунів, їхнім показникам ефективності, а також впливу алгоритмів керування на динаміку, точність та втрати в електроприводі.

Окремо розглянуто різні типи форм вихідних сигналів електронних регуляторів швидкості: трапецієподібне керування, синусоїдальне широтно-імпульсне й векторне керування з урахуванням орієнтації поля, а також просторово-векторну широтно-імпульсну модуляцію простору. Зроблено порівняльний аналіз цих методів за параметрами плавності ходу, рівня шумів, складності реалізації та загальної енергоефективності. Показано, що перехід від простих імпульсних методів до методів з урахуванням орієнтації поля забезпечує суттєве зменшення втрат, стабілізацію моменту та підвищення точності керування, що є критично важливим для безпілотних літальних апаратів з тривалим часом польоту.

У роботі показано важливість багатofакторного моделювання, яке враховує взаємний вплив напруги акумуляторної батареї, форми сигналу, температурних режимів, механічного навантаження та параметрів двигуна. Встановлено необхідність подальших досліджень у напрямку оптимізації алгоритмів електронних регуляторів швидкості та аналізу їхнього впливу на ресурс акумулятора й загальну енергоефективність системи електроживлення безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат І класу; безколекторний електродвигун; система живлення; адаптивне керування; енергоефективність; електронний регулятор швидкості; форма сигналу.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасних умовах ведення бойових дій та виконання завдань повітряної розвідки безпілотні літальні апарати (БпЛА) І класу набули широкого застосування завдяки своїй ефективності, мобільності, відносній дешевизні та здатності тривалого автономного функціонування. Ключовими параметрами, що визначають ефективність застосування розвідувальних БпЛА І класу, є час перебування в повітрі та дальність польоту, які безпосередньо залежать від енергоефективності бортової системи електроживлення. Найбільш широкого використання в БпЛА І класу набули безколекторні двигуни постійного струму (Brushless

DC – BLDC-двигуни), тому що вони характеризуються високою питомою потужністю, надійністю та відсутністю механічних контактів.

Система електроживлення БпЛА – це сукупність компонентів, які забезпечують електричною енергією всі бортові системи апарата, зокрема рушійну установку (електродвигуни), бортову електроніку (польотний контролер, сенсори, GPS, зв'язок тощо), а також навігаційні та обчислювальні блоки.

Основні компоненти системи живлення БпЛА:

1) джерело живлення – це, як правило, літій-полімерні або літій-іонні акумуляторні батареї (АКБ);

2) електронний регулятор швидкості (ESC – Electronic Speed Controller), який перетворює постійну напругу з АКБ в імпульсний сигнал керування струмами в обмотках BLDC-електродвигуна;

3) BLDC-двигуни;

4) польотний контролер, який координує роботу ESC, сенсорів, стабілізації положення, GPS тощо;

5) система розподілу живлення (PDB або Power Management Unit) розподіляє живлення від акумулятора на всі підсистеми (ESC, контролер, передавач, камери);

6) радіоканал забезпечує зв'язок наземної та бортової апаратури.

Електроенергія на борту БпЛА витрачається для забезпечення різних споживачів: приймально-передавального модуля, навігаційних систем, живлення корисного навантаження, системи управління рухом БпЛА тощо. Проте основним споживачем електричної енергії на борту БпЛА є електродвигун, живлення якого здійснюється через ESC-контролери, які споживають 60–80% усієї електроенергії БпЛА [1–3]. Структурну схему розподілу потужності в типовому БпЛА наведено на рис. 1.

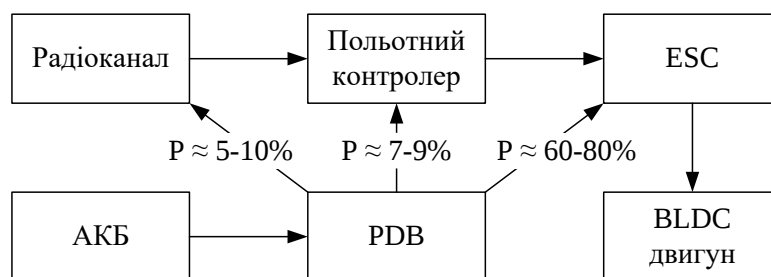


Рис. 1. Структурна схема розподілу потужності в типовому БпЛА

Отже, оптимізація роботи ESC-контролера дозволить отримати найбільший приріст у тривалості виконання бойового завдання, одним із її шляхів є вибір його типу.

На сьогодні відомо кілька типів ESC-контролерів, що відрізняються між собою архітектурою побудови, вартістю, складністю, а головне – формою струмів живлення обмоток BLDC-двигуна. Від останньої залежить ефективність роботи електродвигуна, оскільки саме форма струму визначає величину магнітного поля, яке взаємодіє з обмоткою якоря, створюючи силу, що призводить до обертання.

Отже, є актуальна потреба в аналізі відомих типів ESC-контролерів для визначення найкращого з них з огляду на енергоефективність бортової системи електроживлення

розвідувальних БпЛА І класу, що критично важливо для виконання розвідувальних завдань. Розв'язання цієї проблеми дозволить суттєво підвищити енергоефективність БпЛА без значного ускладнення конструкції або зростання вартості апарата.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових роботах розглядається вплив форми вихідного сигналу ESC-контролера, спрямований на підвищення енергоефективності, надійності та оптимізації теплових режимів електродвигуна.

Відповідно до досліджень [4], традиційні ESC-контролери, що використовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) – Pulse Width Modulation (PWM), мають просту реалізацію, але створюють значні гармонічні спотворення та втрати енергії на перемикання. Натомість використання вихідних сигналів синусоїдальної форми, описаних у [5], забезпечує плавніше керування струмом і зменшення рівня шуму та вібрацій, що позитивно впливає на ресурс двигуна й ефективність. Проте в цих публікаціях розглянуто порівняння лише двох найпростіших за своєю реалізацією ESC-контролерів.

У [6, 7] показано, що застосування ESC-контролерів із синусоїдальним керуванням дозволяє досягти на 10–15% вищої енергоефективності порівняно з традиційними PWM-системами, особливо в умовах частих змін навантаження та швидкості обертання. Однак автори не розглянули наслідків від ускладнення системи.

У статті [8] зазначено, що синусоїдальна модуляція дозволяє зменшити імпульсні струми, що також позитивно впливає на температурний режим роботи двигуна, однак не досліджено збільшення тепловиділення на вихідному каскаді ESC-контролера.

У публікаціях [9, 10] зазначено, що використання синусоїдальних ESC у розвідувальних БпЛА сприяє збільшенню тривалості польоту до 8–12% за рахунок зниження загального споживання енергії.

В [11] зазначено, що синусоїдальна модуляція потребує складніших алгоритмів і підвищених вимог до обчислювальних ресурсів мікроконтролера, що може впливати на масу, вартість та складність програмного забезпечення БпЛА.

Отже, узагальнення останніх наукових праць свідчить, що, попри наявність окремих результатів дослідження впливу форми вихідного сигналу ESC-контролерів на роботу електродвигунів, питання комплексного аналізу цих систем залишається недостатньо опрацьованим [12]. У більшості з них увагу зосереджено переважно на порівнянні традиційних PWM-систем із синусоїдальними методами керування, тоді як ширший спектр сучасних підходів, включно з FOC (Field-Oriented Control) та SVPWM (Space Vector PWM), розглядається фрагментарно або без урахування їх взаємного впливу на енергоефективність та теплові режими силової електроніки. У згаданих роботах здебільшого аналізуються лише окремі параметри: зменшення гармонічних спотворень, покращення плавності моменту або зниження рівня вібрацій. Натомість комплексний взаємозв'язок між формою сигналу, втратами у вихідному каскаді ESC, масогабаритними характеристиками апаратури, вимогами до обчислювальних ресурсів та впливом на тривалість польоту БпЛА – практично не розглянутий. Отже, у сучасній науковій літературі відсутнє ґрунтовне порівняння всіх методів побудови ESC-контролерів та їхніх вихідних сигналів у єдиному підході, що враховував би одночасно енергетичні, теплові,

конструктивні й експлуатаційні характеристики. Це формує чітку наукову прогалину та вказує на необхідність проведення системного дослідження, спрямованого на створення інтегральної методики оцінювання енергоефективності ESC-контролерів у контексті їх застосування в розвідувальних БпЛА.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є аналіз бортових систем електроживлення розвідувальних БпЛА I класу з BLDC-двигуном та визначення найкращої з них щодо енергоефективності, а також пошук шляхів підвищення енергоефективності системи керування BLDC-двигунами БпЛА I класу.

Виклад основного матеріалу. Для формування трифазного струму для BLDC-двигуна в БпЛА використовуються різні типи вихідних сигналів ESC-контролерів залежно від необхідної дальності польоту, енергоефективності, зносостійкості, рівня вібрацій та доцільності застосування дорогого обладнання. Функцію перетворення постійної напруги АКБ у трифазну покладено на ESC-контролер (рис. 2).



Рис. 2. Призначення ESC-контролера

Сигнал для ESC-контролера є періодичною функцією зі сталим періодом повторення (20 мс) та змінною тривалістю імпульсу від 0,544 мс до 2,4 мс (PWM Servo), приклад якого наведено на рис. 3.

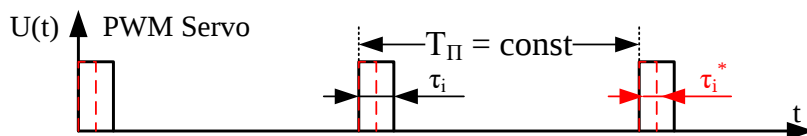


Рис. 3. Сигнал PWM Servo від польотного контролера

До складу типового ESC-контролера входить: мікроконтролер (Micro Controller Unit – MCU), узгоджувальний пристрій для адаптації вихідних сигналів MCU в сигнали керування транзисторами вихідного каскаду – Gate Driver, DC/DC-перетворювач, вихідний каскад ESC-контролера (рис. 4).

За вихідний каскад ESC-контролера зазвичай використовують шість польових транзисторів, об'єднаних попарно в три плеча (за кількістю обмоток BLDC-двигуна). Для створення позитивної напруги на відповідному виході відкривається верхній транзистор плеча, а для створення нульового потенціалу – нижній. DC/DC-перетворювач призначений для створення відповідних напруг для роботи MCU та периферійних пристроїв, що живляться напругами, нижчими від напруги АКБ. Залежно від необхідної форми вихідного сигналу до схеми додаються відповідні датчики та допоміжні блоки. Від форми та способу формування вихідного сигналу ESC-контролера залежить ефективність роботи електродвигуна, шум, електромагнітні перешкоди та нагрівання BLDC-двигуна, а також стабільність його роботи.

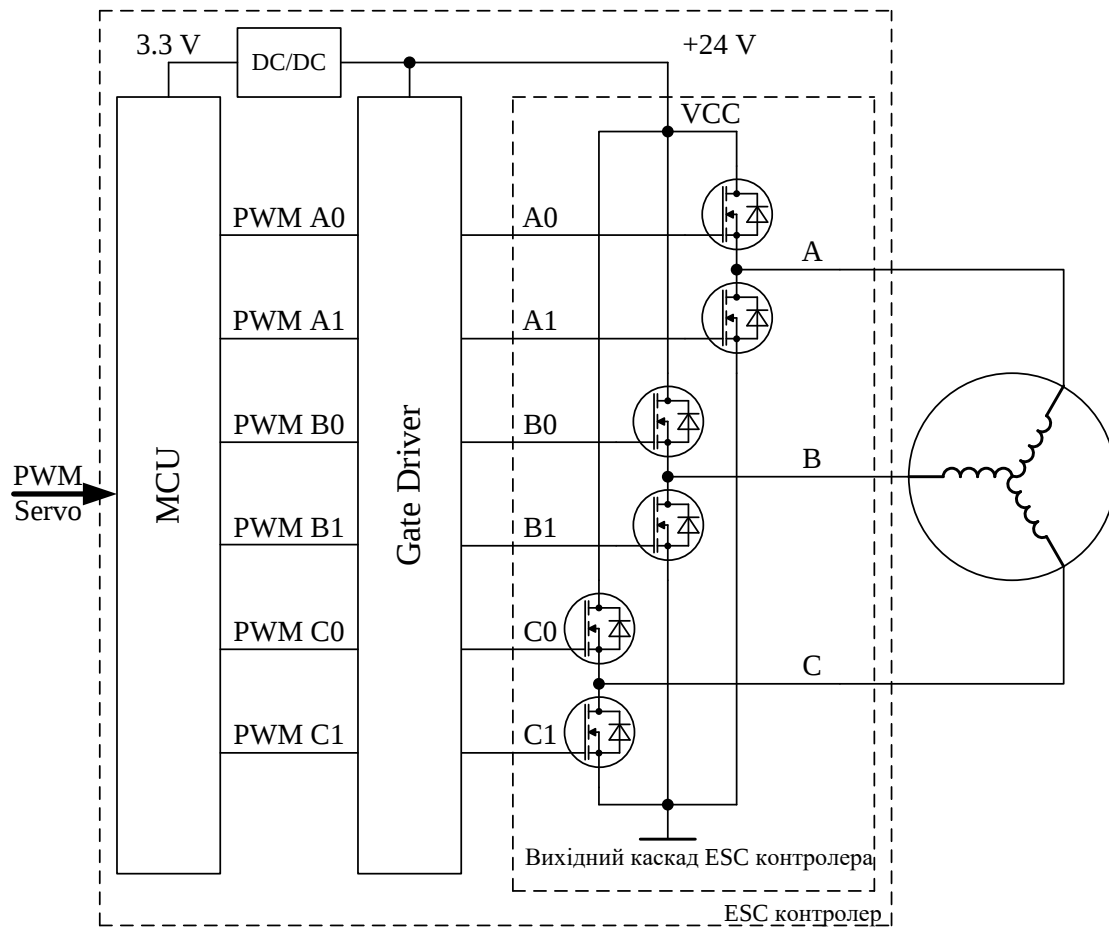


Рис. 4. Структура типового ESC-контролера

Залежно від способу формування основними типами вихідного сигналу ESC-контролера є: сигнал із трапецієподібною ШІМ (Trapezoidal PWM); сигнал із синусоїдальною ШІМ (Sinusoidal PWM); сигнал керування з урахуванням орієнтації поля (FOC); сигнал із векторною ШІМ простору (SVPWM – Space Vector PWM).

В основу роботи ESC-контролера, що забезпечує формування вихідного сигналу з трапецієподібною ШІМ покладено почергову комутацію обмоток електродвигуна до напруги АКБ: у будь-який момент часу на одну з обмоток подається напруга живлення, друга обмотка ротора електродвигуна з'єднується з нульовим потенціалом, а третя використовується для контролю положення (рис. 5).

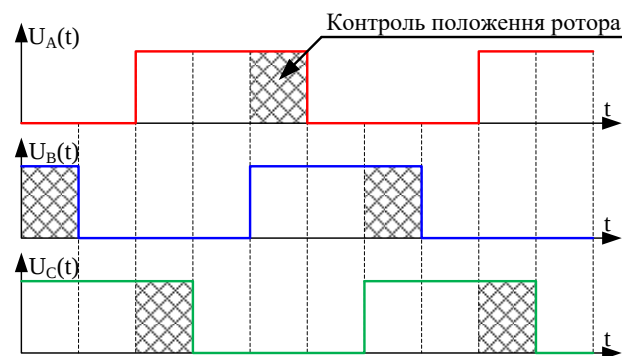


Рис. 5. Вихідний сигнал ESC-контролера з трапецієподібною ШІМ

Для формування таких напруг як керувальний MCU у ESC-контролері використовують прості низькопродуктивні 8-бітні однокристальні мікроконтролери (ОМК), які за заданим алгоритмом та інформацією від польотного контролера про необхідну швидкість обертання ротора BLDC-двигуна формують періодичну послідовність із заданою частотою. У такому разі частота зміни вихідного сигналу ESC-контролера дорівнює частоті обертання колектора електродвигуна. Контроль положення ротора BLDC-двигуна здійснюється шляхом вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції в неактивній фазі (обидва транзистори в цій фазі закриті (див. рис. 4)) за наявності сигналу на виході операційного підсилювача (рис. 6).

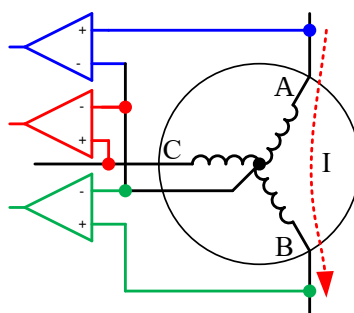


Рис. 6. Фрагмент схеми контролю положення ротора

За такого способу формування вихідних сигналів керування ESC-контролера струми в обмотках BLDC-двигуна мають форму, близьку до трапеції (рис. 7).

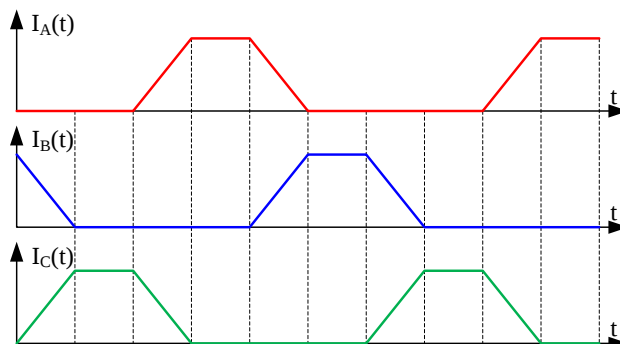


Рис. 7. Енюри струмів на обмотках BLDC-двигуна за трапецієподібного вихідного сигналу ESC-контролера

Перевагами застосування ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є:
простота схемного рішення;

можливість використання простих низькопродуктивних 8-бітних ОМК, які є відносно дешевими;

можливість використання низькочастотної радіоелементної бази, що значно дешевша.

Недоліками ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є:

значний нагрів BLDC-двигуна, пов'язаний із живленням його обмоток прямокутними імпульсами, що мають широкий спектр гармонік (порівняно з гармонічною напругою), тому в підсумку більша частина енергії живлення перетворюється в реактивну;

низька енергоефективність через значні реактивні втрати енергії та зниження сили постійних магнітів через їх нагрів;

високий рівень вібрації BLDC-двигуна внаслідок ривків ротора через імпульсний характер живлення обмоток, що викликає прискорене механічне зношування, підвищений рівень шуму (вкрай небажаний для розвідувальних БПЛА) та необхідність застосування стабілізованих підвісів корисного навантаження.

Саме тому застосування ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є доцільним для дронів-камікадзе та БПЛА, які не потребують високої дальності польоту та не критичні щодо вібрацій.

Прикладом ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є контролери HobbyKing, EMAX, SimonK ESC, що використовуються в побутових квадрокоптерах, DIY-дронах, FPV (наприклад, F450, Nazgul5).

Більш досконалі ESC-контролери формують трифазну синусоїдальну напругу за допомогою ШІМ. Струми в обмотках при цьому мають синусоїдальну форму та зсунуті на 120° один відносно іншого, що відповідає просторовому розташуванню обмоток у статорі (рис. 8).

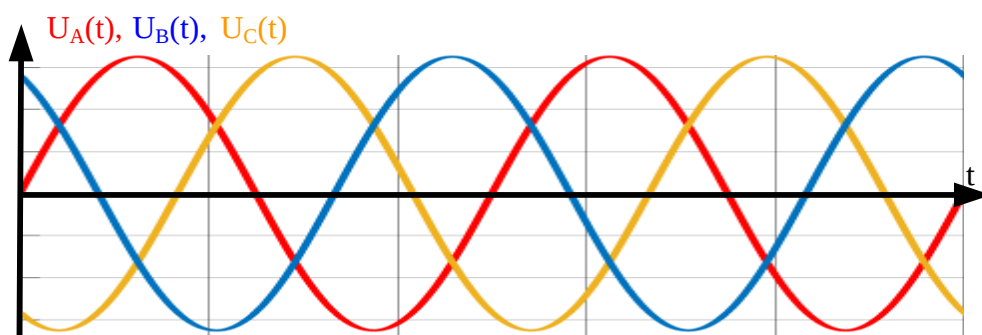


Рис. 8. Вихідний сигнал ESC-контролера із синусоїдальним ШІМ

В основу формування гармонічного сигналу із синусоїдальною ШІМ покладено формування періодичної послідовності імпульсів зі сталим періодом та тривалістю імпульсу, пропорційною значенню функції синусу в поточний момент часу. Принцип реалізації формування вихідного сигналу синусоїдальної форми простіше показати на прикладі формування сигналу для одного із каналів на спрощеній схемі та вихідного силового каскаду (рис. 9).

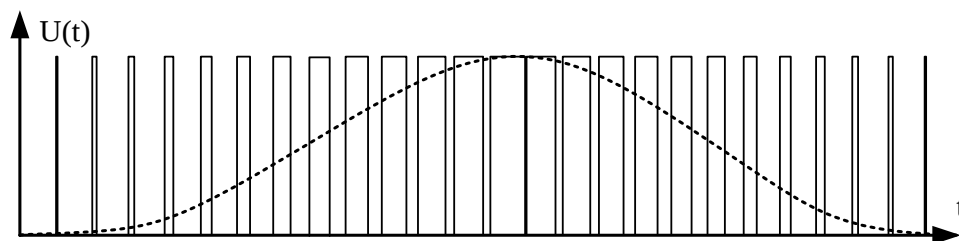


Рис. 9. Принцип перетворення ШІМ-сигналу в синусоїдальну напругу

У разі застосування 8-бітних ОМК для генерування вихідного сигналу ESC-контролеру синусоїдальної форми слід завчасно обрахувати та зберегти в пам'яті ОМК 256 значень для позитивної півхвилі та стільки ж для негативної. Це означає, що для отримання синусоїдального сигналу тактова робоча частота MCU повинна бути не менше ніж у 512 разів вища за необхідну частоту обертання ротора BLDC-двигуна.

Вихідний сигнал ESC-контролера являє собою три зсунуті за фазою на 120° , модульовані функцією синуса, періодичні послідовності, які двигун «сприймає» як синусоїдальні, завдяки індуктивності обмоток.

Основними перевагами використання ESC-контролерів із вихідним сигналом із синусоїдальною ШІМ є:

- зменшення пульсацій крутного моменту (у разі синусоїдального керування струм у фазах змінюється плавно, що забезпечує рівномірний крутний момент упродовж усього електричного циклу), що особливо важливо для стабільності польоту БпЛА, зменшення рівня акустичного шуму, точного позиціонування ротора електродвигуна в кожен момент часу та мінімізації механічних вібрацій електродвигуна;

- зниження нагріву електродвигуна через зменшення спектра сигналу, що, у свою чергу, призводить до зменшення нагріву обмоток і магнітів та сприяє збільшенню ресурсу роботи BLDC-двигуна;

- вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) завдяки плавному обертанню магнітного поля, що зумовлює зниження механічних втрат на вібрації та більш ефективне використання магнітного поля ротора (двигун може працювати з більшим крутним моментом за тих самих витрат енергії);

- стійка робота на малих обертах, якої досягають завдяки тому, що на відміну від трапецієподібних ESC-контролерів у системах на низьких швидкостях спостерігається смикання двигуна, а використання синусоїдального керування дозволяє підтримувати плавність навіть за дуже малих швидкостей, що сприяє плавному запуску БпЛА;

- менший рівень електромагнітних завад, оскільки сигнал близький до гармонічного (генерується менше високочастотних складових), що, у свою чергу, веде до зниження вимог до фільтрації та зменшує вплив завад на бортову електроніку;

- збільшення ресурсу та покращення надійності роботи електродвигуна за рахунок меншого навантаження на підшипники й механічні вузли, стійкіші параметри обмоток і магнітів через зниження температури та зменшення ризиків відмови під час критичних режимів польоту завдяки збільшенню стабільності крутного моменту.

З-поміж недоліків застосування ESC-контролерів із вихідним сигналом із синусоїдальною ШІМ слід зазначити такі:

- майже удвічі вища вартість такого ESC-контролера, оскільки для забезпечення реалізації синусоїдальної ШІМ потрібні більш високопродуктивні MCU з достатнім об'ємом пам'яті, швидкодіючі силові ключі (більш високочастотні польові транзистори) і драйвери для роботи на високих частотах, а також додаткові елементи захисту;

- наявність додаткових втрат енергії на перемикання, спричинених тим, що ключі постійно працюють на високій частоті, а це призводить до збільшення втрат на перемикання в польових транзисторах, що, у свою чергу, зумовлює посилення вимог до радіаторів і систем охолодження ESC-контролера;

збільшення масогабаритних показників, обумовлене необхідністю використання додаткових конденсаторів для згладжування пульсацій струму та використання систем охолодження (радіатори, кулери);

обмеження максимальної швидкості, пов'язане зі зниженням ефективності роботи ESC-контролера на високих обертах через втрати на перемикання транзисторів;

складність алгоритму роботи ESC-контролера, зумовлена необхідністю точно відстежувати положення ротора (датчики Холла) або застосовувати бездатчикові алгоритми. Для бездатчикових методів важко забезпечити стабільний запуск двигуна на нульових обертах. Такі алгоритми складніші в програмуванні й налаштуванні, потребують налагодження для кожного конкретного двигуна;

підвищені вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС), пов'язані з тим, що, незважаючи на менший акустичний шум, під час високочастотного перемикання ключів генеруються широкосмугові високочастотні завади, що може впливати на системи зв'язку БПЛА, навігаційні системи та датчики (наприклад, магнітометри).

Прикладом застосування таких ESC-контролерів є STMicroelectronics, Infineon, що використовуються на БПЛА DJI Phantom 3, Walkera Scout X4.

Ще однією проблемою застосування ESC-контролерів як із трапецієвидним вихідним сигналом, так і з вихідним сигналом із синусоїдальною ШІМ є неврахування кутового положення ротора BLDC-двигуна. Через механічні навантаження чи інерційність ротора виникає ситуація, коли його обертання починає випереджати або відставати від обертання магнітного поля. У такому разі різко зростають втрати крутного моменту через витрати енергії, пов'язані зі збільшенням реактивної потужності.

Для усунення цієї проблеми використовується спосіб формування вихідного сигналу ESC-контролера з FOC. Принцип його роботи полягає в керуванні безпосередньо магнітними векторами напряму, для цього він створює на своїх виходах математично обчислені сигнали з урахуванням положення ротора.

У трифазному двигуні протікають струми (I_A , I_B , I_C), які фізично розташовані під кутом 120° у просторі. У такій системі вони є лінійно залежними, а їх векторна сума дорівнює 0 ($I_A + I_B + I_C = 0$ для симетричної системи). Тому для спрощення обрахунків проводиться перетворення трифазних струмів (I_A , I_B , I_C) у два ортогональні компоненти: I_d (створює магнітне поле), I_q (створює крутний момент).

У двигуні з постійними магнітами крутний момент виникає лише тоді, коли магнітне поле статора перпендикулярне до поля ротора. ESC керує обома компонентами незалежно, оптимізуючи роботу двигуна в реальному часі для максимальної ефективності. Для BLDC із постійними магнітами немає потреби в додатковому збудженні, тому ESC намагається тримати $I_d \approx 0$. Тоді увесь струм витрачається на компонент I_q , тобто максимально ефективно створює крутний момент.

Це відбувається з використанням перетворення Кларка (Clarke transform), що переводить трифазні струми (I_A , I_B , I_C) у двофазну систему координат (I_α , I_β), яка є еквівалентом у нерухомій системі координат:

$$I_\alpha = I_A;$$

$$I_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_A + 2I_B),$$

де I_{α} – проєкція струму на вісь α (зазвичай збігається з фазою A);

I_{β} – проєкція струму на вісь β , зсунуту на 90° від α .

Фактично ми замінюємо трифазну систему струмів еквівалентним двовимірним вектором у площині (α, β) (рис. 10).

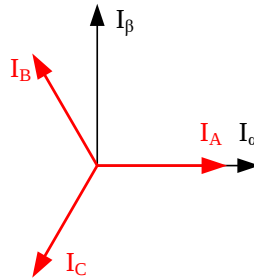


Рис. 10. Просторове подання перетворення Кларка

Оскільки ротор електродвигуна обертається, то синхронно з ним має обертатися й наша система координат, що можна здійснити за допомогою перетворення Парка, яке перетворює цей вектор у систему координат ротора (d, q) .

У разі перетворення Парка (Park Transform), обертова система координат (α, β) трансформується в систему, що обертається разом із ротором (d, q) :

$$I_d = I_{\alpha} \cos \theta + I_{\beta} \sin \theta;$$

$$I_q = -I_{\alpha} \sin \theta + I_{\beta} \cos \theta,$$

де θ – кут положення ротора;

I_d – це складова струму, яка спрямована вздовж магнітного потоку ротора, вона не створює моменту;

I_q – це складова струму, перпендикулярна до поля ротора, яка безпосередньо створює крутний момент.

У системі FOC ми виконуємо регулювання в координатах I_d та I_q , досягаючи створення максимального крутного моменту. Після обрахунку параметрів I_d та I_q потрібно повернутися до нерухомої системи координат за допомогою зворотного перетворення Парка:

$$I_{\alpha} = I_d \cos \theta - I_q \sin \theta;$$

$$I_{\beta} = I_d \sin \theta + I_q \cos \theta.$$

Оскільки використовуємо електродвигун із трьома обмотками, то слід повернутися до трифазної системи координат за допомогою зворотного перетворення Кларка.

ESC-контролер формує напруги, тому слід розрахувати відповідні значення (U_A , U_B , U_C) та на їх основі згенерувати відповідні ШІМ-сигнали для кожної із фаз.

Перевагами застосування ESC-контролерів із векторним керуванням є:

високий ККД, якого досягають через розкладання струму обмоток електродвигуна на I_d (магнітне поле) та I_q (крутний момент), яке дозволяє утримувати $I_d \approx 0$ (у двигунах із постійними магнітами), тобто увесь струм іде на створення крутного моменту;

плавність роботи двигуна, яка є наслідком того, що магнітне поле завжди перпендикулярне до поля ротора, тому крутний момент ідеально рівномірний (мінімум вібрацій та низький рівень шуму);

висока динаміка й точність, які досягаються за рахунок прямого регулювання I_q , що дає можливість точного керування швидкістю, прискоренням і навіть положенням;

зменшення нагріву й триваліший ресурс двигуна можливі через високий ККД;

точний контроль моменту навіть на нульових обертах, тому що FOC ESC завжди точно знає кут ротора, що дає можливість плавного пуску та забезпечує стабільну роботу електродвигуна навіть на дуже малих швидкостях.

Для реалізації ESC-контролера з FOC-керуванням до складу схеми (див. рис. 4) слід додати: датчики струму кожної із фаз, додатковий MCU з швидкодіючим аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) для спрощення вимірювання та перерахунку параметрів струмів і напруг, PID-регулятор (Proportional Integral Derivative) для врахування інерційності електродвигуна (рис. 11).

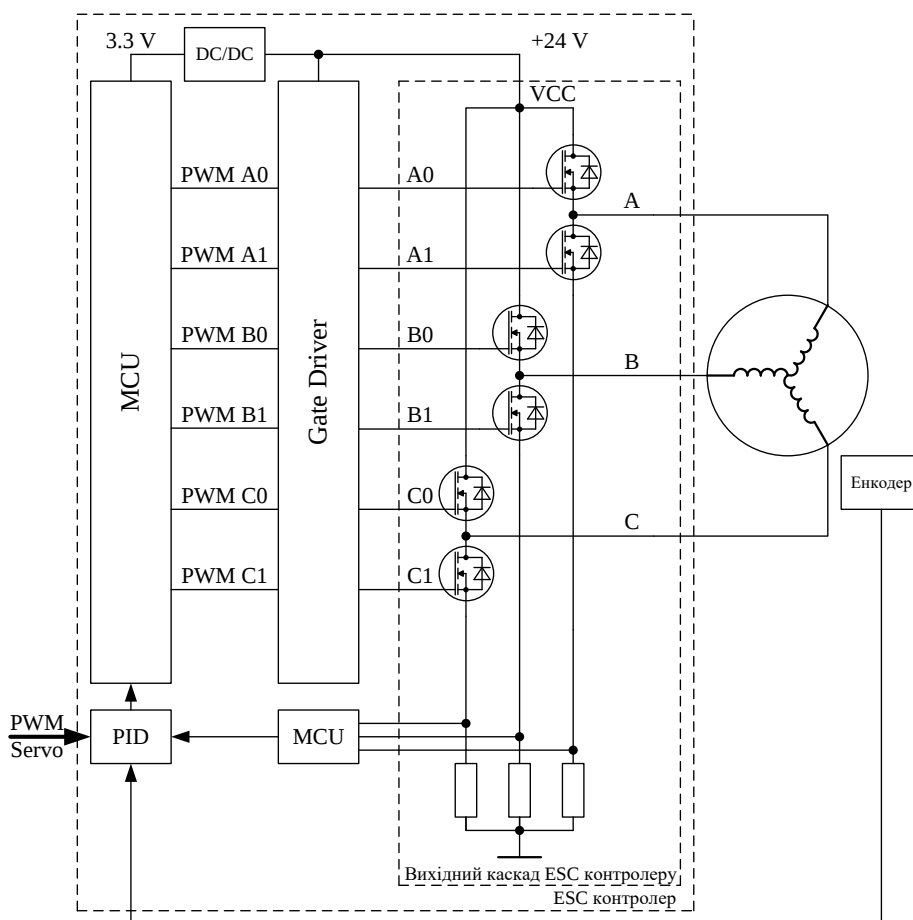


Рис. 11. Структура ESC-контролера з FOC

З-поміж недоліків FOC варто зазначити такі:

висока обчислювальна складність, оскільки алгоритм FOC вимагає виконання перетворень Кларка – Парка, зворотних перетворень та генерації ШІМ у реальному часі, що потребує швидкодіючих мікроконтролерів, а також необхідність застосування систем охолодження;

високі вимоги до точності визначення положення ротора, зумовлені тим, що його кутове значення використовується для обрахунку струмів;

дороговартість ESC контролера, спричинена необхідністю використання потужних MCU, швидких драйверів, датчиків струму та положення. FOC-контролер коштує в кілька разів дорожче, ніж за ESC-контролери з вихідним сигналом із синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією;

складність налаштування та реалізації, пов'язані з необхідністю врахування точних значень параметрів двигуна: індуктивності, опору обмоток, кількості полюсів, моментної константи;

потреба в застосуванні систем охолодження MCU та транзисторів вихідного каскаду через значні втрати, обумовлені високою частотою перемикань.

Отже, FOC забезпечує: високий ККД, плавність і точність, але за рахунок підвищеної складності, високих обчислювальних й апаратних вимог, більшої ціни та складності в налаштуванні.

Прикладом використання таких контролерів у зразках озброєння є ESC-контролери: Texas Instruments (DRV83xx, C2000), STMicroelectronics (STM32G4), Microchip (dsPIC33CK), NXP (MC56F84xxx), – що встановлені в БпЛА: Bayraktar TB2, UkrJet UJ-31 Zlyva, Thales Spy'Ranger, RQ-11 Raven.

Основним недоліком ESC-контролерів із FOC є великі втрати електричної енергії на транзисторах під час переключення вихідного каскаду, саме тому система охолодження є обов'язковою умовою їх тривалої роботи.

Для зменшення втрат електричної енергії у вихідному каскаді використовують метод формування вихідних сигналів ESC-контролера з векторною ШІМ простору (SVPWM). Його робота полягає у формуванні вихідних сигналів ESC із використанням перетворень Кларка – Парка, але прямокутної форми (як і в Trapezoidal PWM), послідовність і тривалість яких вираховується залежно від положення ротора та необхідного крутного моменту. Це допомагає знизити частоту перемикання вихідних транзисторів, а саме скоротити час роботи транзистора в перехідному режимі, що значно зменшує теплові втрати, дозволяє послабити вимоги до систем тепловідведення та охолодження, а отже, зменшити вагу.

На відміну від класичної синусоїдальної ШІМ, у якій кожна фаза інвертора керується незалежно, метод SVPWM розглядає трифазну систему як єдиний вектор напруги, що обертається в площині двох ортогональних координат ($\alpha - \beta$) (рис. 12). Це дозволяє оптимізувати процес комутації, підвищити коефіцієнт використання напруги живлення та зменшити гармонічні спотворення вихідних струмів.

У трифазному інверторі з шістьма силовими транзисторами можливі вісім станів комутації: шість активних векторів напруги, розташованих під кутом 60° один до одного

в площині $\alpha - \beta$, та два нульові вектори, які відповідають станам, коли всі верхні або всі нижні ключі увімкнені.

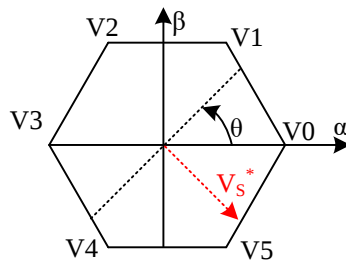


Рис. 12. Геометричне подання просторових векторів напруг у методі SVPWM

Комбінація цих векторів формує регулярний шестикутник, у межах якого може знаходитися будь-який бажаний вектор напруги V_s^* .

У межах кожного періоду ШІМ-алгоритм визначає, у якому секторі шестикутника перебуває вектор V_s^* , і формує його шляхом послідовного прикладання двох сусідніх активних векторів та одного нульового.

Отже, алгоритм SVPWM відтворює бажану векторну напругу за допомогою комбінації дискретних станів вихідного каскаду.

Зниження частоти комутації вихідних ключів ESC-контролера відбувається за рахунок того, що один оберт двигуна розбивається на шість секторів, кожен із яких характеризується певною комбінацією увімкнених та вимкнених транзисторів.

Основними перевагами використання ESC-контролерів із вихідним сигналом, сформованим за методом Space Vector PWM (SVPWM), є:

більш ефективне використання постійної напруги джерела живлення (до 15%), максимальна амплітуда вихідної напруги при цьому може досягати значення $0,907 \cdot$ від напруги живлення замість 0,866, що дозволяє зменшити струми в обмотках двигуна;

зменшення втрат на перемикання пов'язане з тим, що SVPWM формує оптимізовану послідовність комутацій (кількість перемикань силових ключів значно менша порівняно із синусоїдальною ШІМ);

покращення плавності обертання ротора: SVPWM забезпечує більш рівномірне обертання магнітного поля в статорі, що зменшує пульсації крутного моменту, що зумовлює зниження рівня вібрацій, підвищення стабільності роботи двигуна, а отже, подовжує строк служби електродвигуна та його механічних вузлів;

висока сумісність із векторним керуванням (FOC): метод SVPWM є природним продовженням алгоритмів векторного керування, оскільки формує напруги безпосередньо в системі координат $\alpha - \beta$ та дозволяє більш точно реалізовувати обчислені FOC напруги на фазах двигуна, забезпечуючи мінімальну фазову помилку між напругою та струмом, що веде до максимального ККД електропривода;

зниження теплового навантаження на силові ключі: завдяки рівномірному розподілу активних векторів у межах шестикутника просторового вектора напруги, забезпечується рівномірне навантаження на транзистори та симетричний розподіл тепла, що зменшує ризик локального перегріву ESC-контролера;

можливість роботи на підвищених частотах: метод SVPWM забезпечує стабільність керування навіть за високих частот перемикання, що дозволяє використовувати його у високошвидкісних двигунах БПЛА, не втрачаючи точності формування напруги та моменту.

Недоліками застосування ESC-контролерів із формуванням вихідного сигналу за методом Space Vector PWM (SVPWM) є такі:

висока обчислювальна складність алгоритму, оскільки метод вимагає постійного обчислення сектора розташування миттєвого вектора напруги та відповідних тривалостей імпульсів ШІМ. Для реалізації таких обчислень у реальному часі необхідно використовувати високопродуктивні мікроконтролери з апаратною підтримкою тригонометричних операцій, що значно ускладнює реалізацію: підвищує споживання енергії контролером і збільшує вартість апаратної частини;

чутливість до точності визначення положення ротора (для правильного формування просторового вектора напруги необхідно знати точне миттєве значення кута ротора (θ), оскільки помилка його визначення призводить до фазового зсуву між векторами струму та напруги, що знижує ефективність, створює додаткові реактивні втрати та може спричинити втрату синхронізації магнітного поля);

підвищені вимоги до апаратної частини обґрунтовані тим, що для забезпечення високої точності комутації та мінімізації гармонічних спотворень необхідно використовувати високошвидкісні драйвери затворів, швидкодіючі датчики струму в кожній фазі та низькоіндуктивні з'єднання в силовому колі. Це зумовлює зростання собівартості виготовлення ESC-контролера, ускладнює трасування друкованої плати (часто потрібно 4–6-шарові друковані плати) і призводить до збільшення масогабаритних показників модуля;

зростання вартості та власного енергоспоживання контролера відбувається через необхідність використання потужних MCU, швидких аналогових підсистем і прецизійних сенсорів. Ціна ESC-контролера, що реалізує SVPWM, може бути на 40–80% вищою, ніж аналогічного із синусоїдальною ШІМ. Крім того, власне споживання енергії мікроконтролером і драйверами може становити до 5–8% від загальної потужності системи, що є суттєвим для БПЛА малої маси, де енергоефективність є критично важливою.

Найбільш широкого впровадження в зразках БПЛА набули ESC-контролери: Infineon (XMC4800), TI (C2000), STMicroelectronics (STSPIN32G4), Zubax Robotics («Муха V2», Orel 20), – що застосовуються в DJI Mavic 3, AeroVironment Puma, Skyeton Raybird-3, Quantum Trinity F9.

Отже, проведений аналіз методів формування вихідних сигналів ESC-контролерів показав, що вибір алгоритму керування безпосередньо впливає на енергоефективність, надійність і стабільність роботи безколекторних електродвигунів, які застосовуються в розвідувальних БПЛА.

Прості схеми керування з трапецієподібною ШІМ забезпечують мінімальну вартість та простоту реалізації, проте характеризуються значними втратами енергії, підвищеними вібраціями й низькою стабільністю обертання.

Використання синусоїдальної ШІМ дозволяє суттєво підвищити плавність роботи електродвигуна, зменшити нагрів та знизити рівень електромагнітних завад, однак вимагає потужніших мікроконтролерів і складніших алгоритмів керування.

Векторне керування з орієнтацією поля (FOC) забезпечує максимальну точність регулювання крутного моменту і найвищий коефіцієнт корисної дії, проте має високу складність програмно-апаратної реалізації, потребує точного визначення положення ротора.

Метод Space Vector PWM (SVPWM), особливо в комбінації з FOC, є найбільш збалансованим сучасним рішенням, що поєднує високу енергоефективність, плавність моменту, оптимальне використання напруги живлення та можливість роботи в широкому діапазоні швидкостей.

Водночас його застосування доцільне переважно у висококласних системах електроприводу БпЛА, де критичними є параметри плавності, точності та ККД, а додаткові витрати на складність апаратури виправдовуються підвищенням тривалості польоту та надійності роботи всієї системи.

SVPWM є покращеною формою ШІМ, що використовує математичну модель просторових векторів напруги для формування максимально ефективного фазного сигналу. Цей метод дозволяє збільшити використання напруги живлення до 15% порівняно зі звичайною синусоїдальною ШІМ, що особливо важливо для БпЛА, де енергетичний запас обмежений.

Крім того, SVPWM нівелює пульсації струму, забезпечує більш плавну комутацію, менший акустичний шум та знижує втрати перемикання завдяки мінімізації часу роботи транзисторів у перехідних режимах. У поєднанні з FOC SVPWM є найбільш ефективним методом керування сучасними BLDC, що демонструє найкращі показники стабільності моменту, температурного режиму та енергоефективності.

Отже, FOC та SVPWM слід розглядати як взаємодоповнювальні технології, що в сукупності забезпечують оптимальне керування двигуном в енергообмежених системах БпЛА. Їх застосування дозволяє мінімізувати електромагнітні втрати, збільшити ККД ESC, а також забезпечити плавність тяги та покращити загальну динаміку польоту. Це робить такі методи ключовими для подальшого розвитку енергоефективних систем електроживлення БпЛА.

Висновки. Проведений аналіз сучасних методів формування вихідного сигналу ESC-контролерів підтверджує, що вибір алгоритму керування безпосередньо визначає енергоефективність, тепловий режим і динамічні характеристики безколекторних електродвигунів, які є основними споживачами енергії в розвідувальних БпЛА. Порівняння різних методів показало, що трапецієподібна ШІМ є найпростішою, але характеризується підвищеними втратами та нерівномірністю моменту; синусоїдальна ж забезпечує вищу плавність, але має обмеження у використанні напруги.

Найкращі показники ефективності демонструють векторне керування FOC та метод модулювання SVPWM. FOC забезпечує високоточне регулювання електромагнітного моменту та мінімізацію пульсацій струму, тоді як SVPWM дозволяє на 10–15% ефективніше використовувати напругу живлення та зменшує втрати перемикання. Комбінація FOC + SVPWM є найбільш збалансованим і технологічно ефективним

рішенням для БпЛА, оскільки забезпечує максимальний ККД, плавність тяги, низький рівень вібрацій та оптимальне тепловиділення ESC.

Водночас залишається недостатньо дослідженим комплексний вплив параметрів сигналу на енергетичні втрати, нагрівання силових ключів та ресурс роботи двигуна в умовах змінного навантаження. Подальший розвиток напрямку потребує створення багатофакторної моделі, що враховуватиме форму вихідного сигналу ESC-контролера, масу компонентів, теплові процеси та характеристики ESC у динамічних режимах польоту. Розроблення та експериментальна перевірка такої моделі дозволить сформувати основу для адаптивних енергоефективних систем керування електроприводами БпЛА, здатними автоматично оптимізувати форму сигналу залежно від умов експлуатації та режиму польоту.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Efficiency Comparison of Trapezoidal and Sinusoidal Method for Brushless DC Motor Drive // M. A. A. Hassan, A. R. Abdullah, N. Bahari, & M. I. M. Sabri // *Applied Mechanics and Materials*. Aug. 2015. Vol. 785. P. 248–252. URL: AMM.785.248scientific.net. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/>
2. Mukhlisin A., Yuniarto M. N., & Rijanto E. Performance Comparison of BLDC Motor Controllers Designed Based on Trapezoidal Commutation and FOC // *In AIP Conference Proceedings*. Dec. 2019. Vol. 2187, № 1. P. 060002. <https://doi.org/10.1063/1.5138363>
3. Yorat E., Özbek N. S., & Saribulut L. Comparative Analysis of Field Oriented Control of BLDC Motor Using SPWM and SVPWM Techniques // *ResearchGate*. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/322515477_Comparative_analysis_of_field_oriented_control_of_BLDC_motor_using_SPWM_and_SVPWM_techniquesResearchGate (last accessed: 01.10.2025).
4. Іванов О. М., Петров І. С. Системи керування безколекторними двигунами постійного струму: теорія та практика. Київ : Техніка, 2020. 256 с.
5. Azab M. Comparative Study of BLDC Motor Drives with Different Approaches: FCS-Model Predictive Control and Hysteresis Current Control // *World Electr. Veh. J.* Jun. 2022. Vol. 13, № 7. P. 112. <https://doi.org/10.3390/wevj13070112>
6. Ковальчук В. А., Демиденко Т. Г. Порівняльний аналіз алгоритмів керування БКМ у БпЛА // *Електромеханічні системи*. 2021. № 2. С. 42–49.
7. Chen X., Nakamura Y. Adaptive Control of Brushless DC Motors for Energy Efficiency in UAVs // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. Vol. 18, № 5. P. 1125–1135.
8. Шевченко М. В. Вплив форми сигналу на нагрів та втрати в БКМ // *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 31–36.
9. Park J., Kim D. Comparative Study on ESC Topologies in Small UAV Applications // *Journal of Power Electronics*. 2018. Vol. 18, № 2. P. 320–327.
10. Романов С. В., Климчук І. Ю. Оптимізація енерговитрат у системах керування двигунами для безпілотних апаратів // *Вісник авіації та космонавтики*. 2023. № 3. С. 27–34.
11. Lin W., Huang C. Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs // *Electronics*. 2021. Vol. 10, № 11. P. 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>

12. Fotouhi A., Moghaddam M. N., & Zadeh M. K. Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 4. P. 1323. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7926674/> (last accessed: 01.10.2025).
13. How many watts does a drone use? // *EcoFlow Blog*. 2023. URL: <https://blog.ecoflow.com/uk/how-many-watts-does-drone-use/> (last accessed: 01.10.2025).
14. Rojas D. A. Pixhawk and APM Power Consumption // *DIY Drones Blog*. 2014. URL: <https://diydrones.com/profiles/blogs/pixhawk-and-apm-power-consumption> (last accessed: 01.10.2025).
15. Wireless Communications for UAV: Enabling technologies and applications / J. G. Jaramillo et al. // *Frontiers in Energy Research*. 2022 Vol. 10. P. 752012. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.752012/full> (last accessed: 01.10.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. Hassan, M. A. A., Abdullah, A. R., Bahari, N., & Sabri, M. I. M. (Aug. 2015). Efficiency Comparison of Trapezoidal and Sinusoidal Method for Brushless DC Motor Drive. *Applied Mechanics and Materials*, 785, 248–252. Retrieved from AMM.785.248scientific.net. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/>
2. Mukhlisin, A., Yuniarto, M. N., & Rijanto, E. (Dec. 2019). Performance Comparison of BLDC Motor Controllers Designed Based on Trapezoidal Commutation and FOC. In *AIP Conference Proceedings*, 2187, 1, 060002. <https://doi.org/10.1063/1.5138363Academia+2ResearchGate+2Academia+2>
3. Yorat, E., Özbek, N. S., & Saribulut, L. (2018). Comparative Analysis of Field Oriented Control of BLDC Motor Using SPWM and SVPWM Techniques. *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/322515477_Comparative_analysis_of_field_oriented_control_of_BLDC_motor_using_SPWM_and_SVPWM_techniquesResearchGate
4. Ivanov, O. M., & Petrov, I. S. (2020). *Systemy keruvannia bezkolektornymy dvyhunamy postiinoho strumu: teoriia ta praktyka [DC Collectorless Motor Control Systems: Theory and Practice]*. Kyiv [in Ukrainian].
5. Azab, M. (Jun. 2022). Comparative Study of BLDC Motor Drives with Different Approaches: FCS-Model Predictive Control and Hysteresis Current Control. *World Electr. Veh.*, 13, 7, 112. <https://doi.org/10.3390/wevj13070112>
6. Kovalchuk, V. A., & Demydenko, T. H. (2021). Porivnialnyi analiz alhorytmiv keruvannia BKM u BpLA [Comparative Analysis of BKM Control Algorithms in UAVs]. *Elektromekhanichni systemy [Electromechanical systems]*, 2, 42–49 [in Ukrainian].
7. Chen, X., & Nakamura, Y. (2020). Adaptive Control of Brushless DC Motors for Energy Efficiency in UAVs. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 5, 1125–1135.
8. Shevchenko, M. V. (2022). Vplyv formy syhnalu na nahiriv ta vtraty v BKM [The Influence of the Waveform on Heating and Losses in BCM] // *Tekhnichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics]*, 1, 31–36 [in Ukrainian].
9. Park, J., & Kim, D. (2018). Comparative Study on ESC Topologies in Small UAV Applications. *Journal of Power Electronics*, 18, 2, 320–327.

10. Romanov, S. V., & Klymchuk, I. Yu. (2023). Optymizatsiia enerhovytrat u systemakh keruvannia dvyhunamy dlia bezpilotnykh aparativ [Optimization of Energy Consumption in Engine Control Systems for Unmanned Aerial Vehicles]. *Visnyk aviatsii ta kosmonavtyky [Bulletin of Aviation and Cosmonautics]*, 3, 27–34 [in Ukrainian].
11. Lin, W., & Huang, C. (2021). Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs. *Electronics*, 10, 11, 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>
12. Fotouhi, A., Moghaddam, M. N., & Zadeh, M. K. (2021). Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review. *Sensors*, 21, 4, 1323. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7926674/>
13. How many watts does a drone use? (2023). *EcoFlow Blog*. Retrieved from <https://blog.ecoflow.com/uk/how-many-watts-does-drone-use/>
14. Rojas, D. A. (2014). Pixhawk and APM Power Consumption. *DIY Drones Blog*. Retrieved from <https://diydrones.com/profiles/blogs/pixhawk-and-apm-power-consumption>
15. Jaramillo, J. G., et al. (2022). Wireless Communications for UAV: Enabling technologies and applications. *Frontiers in Energy Research*, 10, 752012. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.752012/full>

Yu. L. Bondarenko, I. A. Ishchenko

ANALYSIS OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF RECONNAISSANCE ELECTRIC MOTORS UNMANNED AERIAL VEHICLES OF THE 1st CLASS

The article examines modern approaches to increasing the energy efficiency of power supply systems of unmanned aerial vehicles, in particular, the interaction of power sources, electronic speed regulators and collectorless electric motors is investigated. The structure of a typical energy system of unmanned aerial vehicles, including batteries, power distribution modules, a flight controller and power converters, was analyzed. Special attention is paid to the characteristics of collectorless electric motors, their efficiency indicators, as well as the influence of control algorithms on dynamics, accuracy and losses in the electric drive.

Different types of output signal forms of electronic speed regulators are considered separately - trapezoidal control, sinusoidal pulse width, vector control taking into account field orientation and spatial-vector pulse width modulation of space. A comparative analysis of these methods was made according to the parameters of smoothness of movement, noise level, complexity of implementation and general energy efficiency. It is shown that the transition from simple pulse methods to signal methods taking into account the orientation of the field provides a significant reduction in losses, stabilization of the moment and improvement of control accuracy, which is critically important for unmanned aerial vehicles with a long flight time.

The work shows the importance of multifactorial modeling, which takes into account the mutual influence of battery voltage, waveform, temperature regimes, mechanical load and engine parameters. The need for further research in the direction of optimizing the algorithms of electronic speed regulators and analyzing their impact on the battery life and the overall energy efficiency of the power supply system of unmanned aerial vehicles has been established.

Keywords: *unmanned aerial vehicles of the 1st class; collectorless electric motor; power supply system; adaptive control; energy efficiency; electronic speed regulator; signal form.*

В. А. Романько, О. М. Срібний

ІНТЕГРАЦІЯ НЕЙРОННОГО ФІЛЬТРА КАЛМАНА В СИСТЕМУ НАВЕДЕННЯ ВИСОКОДИНАМІЧНИХ АПАРАТІВ

У статті розглянуто завдання підвищення точності оцінювання стану високодинамічних рухомих об'єктів, зокрема безпілотних літальних апаратів, наземних роботизованих платформ та керованих боєприпасів, шляхом інтеграції методів штучного інтелекту в структуру фільтра Калмана. Показано, що класичний фільтр Калмана, незважаючи на широке застосування в системах наведення та навігації, має суттєві обмеження в умовах нелінійної динаміки, негаусівських завад і наявності викидів у вимірюваннях датчиків. Запропоновано гібридний підхід, у межах якого фільтр Калмана доповнюється нейронною мережею, що формує адаптивну корекцію оцінювання вектора стану. Розроблено математичну модель мультисенсорного злиття даних, яка поєднує вимірювання інерціального вимірювального модуля, супутникової навігаційної системи, а також магнітометра та оптичної камери.

Описано структуру розробленого алгоритму, процес формування вхідного вектора ознак для нейронної мережі, процедуру навчання на основі результатів імітаційного моделювання й використання скоригованої оцінки стану в контурах наведення та стабілізації. Результати моделювання демонструють зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей приблизно на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана, а також підвищення завадостійкості до викидів у супутникових вимірюваннях і зростання рівня шуму інерціальних датчиків. У статті також обґрунтовано можливість реалізації запропонованого алгоритму на бортових обчислювальних модулях з обмеженими обчислювальними ресурсами. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію рекурентних архітектур простору станів у структуру НФК.

Ключові слова: фільтр Калмана; нейронний фільтр Калмана; злиття даних датчиків; інерціальна навігація; безпілотний літальний апарат; самонавідний боєприпас; штучний інтелект; система наведення; високодинамічний апарат.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Одним із ключових напрямів розвитку сучасних систем озброєння та військової техніки є створення високоточної зброї та автономних роботизованих комплексів, здатних ефективно діяти в умовах інтенсивних завад, застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), дезінформації та часткової втрати даних датчиків. Для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних роботизованих платформ і керованих засобів ураження критичною є точність оцінювання їх просторового положення й орієнтації в реальному часі, оскільки від цього безпосередньо залежить точність наведення та ймовірність ураження цілі [1–13].

Типовий датчиковий комплекс високодинамічного апарата включає інерціальні, супутникові, магнітометричні й оптичні вимірювальні канали. Інтеграція та узгоджене

© В. А. Романько, О. М. Срібний, 2025

оброблення даних цих датчиків дозволяє суттєво підвищити точність і завадостійкість навігації, однак вимагає застосування спеціалізованих алгоритмів злиття даних (data fusion, DF) [1–4, 9–12, 16–18]. Така конфігурація покращує завадостійкість, але суттєво ускладнює завдання злиття даних. У реальних умовах експлуатації мають місце:

вібраційні та ударні навантаження, що впливають на інерціальний вимірювальний модуль (Inertial Measurement Unit – IMU);

групові викиди у вимірюваннях глобальної навігаційної супутникової системи (Global Navigation Satellite System / Global Positioning System – GNSS / GPS) під дією засобів РЕБ; локальні магнітні завади;

нестабільність та часткова втрата кадрів оптичного каналу (дим, пил, перешкоди, зміна освітлення).

За таких умов істотно порушуються припущення щодо лінійності моделей і гаусівського характеру шумів, на яких ґрунтується оптимальність класичного фільтра Калмана (ФК). Це призводить до збільшення похибок оцінювання стану та деградації характеристик наведення.

Отже, актуальним є завдання розроблення алгоритму оцінювання стану високодинамічних апаратів, який зберігає математичну строгість та рекурсивну структуру Калмана, але доповнюється адаптивною нейромережевою корекцією, здатною компенсувати нелінійні та контекстно залежні похибки в даних датчиків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи ФК, умови його оптимальності та властивості наведено в класичних роботах Р. Калмана та його послідовників, а також у фундаментальних монографіях з оптимальної фільтрації та оцінювання стану [7–13]. На основі цих результатів побудовано широкий спектр навігаційних систем і систем керування в авіаційній, космічній та наземній техніці [3–5, 12, 18]. Окремі аспекти оптимізації польоту й управління БпЛА, зокрема з урахуванням використання повітряних ретрансляторів і режимів радіомоніторингу, розглянуто в роботах [26, 27].

Для врахування нелінійної динаміки та нелінійних функцій вимірювань широко застосовують розширений ФК (Extended Kalman Filter – EKF) та сигма-точковий (Unscented Kalman Filter – UKF) ФК. Ці методи дозволяють підвищити точність оцінювання стану порівняно з лінійним ФК, однак залишаються чутливими до некоректно заданих коваріацій шумів, грубих викидів у вимірюваннях датчиків та порушення припущень щодо гаусівського характеру шуму [4, 5, 8, 14, 19].

Питання спільного оброблення та злиття даних IMU, GNSS, магнітометра та оптичних каналів детально розглянуто в сучасних роботах з навігації та робототехніки, де проаналізовано інтеграцію GPS / IMU в зашумленому середовищі, побудову схем у змінних помилки (error-state схем) для GNSS / IMU, а також застосування інерціальних та візуальних датчиків у мікролітальних апаратах, що працюють у складних умовах [1–4, 9–12, 16–18]. Окремо в [3] розглянуто параметричний синтез алгоритмів фільтрації для інерціальних навігаційних систем БпЛА, а в [24, 25] – побудову баз даних і навчально-тренувальних систем для автоматизованого оброблення інформації та підготовки операторів безпілотних авіаційних комплексів.

Окремий напрям становлять дослідження, у яких класичний ФК поєднують із нейронними мережами або глибокими моделями. У працях [6, 9, 15, 19–21] запропоновано різні варіанти Deep Kalman Filters, нейромережеву апроксимацію нелінійної динаміки, а також гібридні схеми, де нейромережеві модулі коригують параметри ФК або формують допоміжні сигнали для підвищення точності оцінювання стану. Додатково в [28] запропоновано алгоритм формування набору апріорних даних для згорткових нейронних мереж, призначених для автоматизованого оброблення цифрових аерознімків, що є релевантним для побудови інтелектуальних модулів аналізу бортової оптичної інформації.

Отже, доцільно розглянути структурну інтеграцію нейронної мережі в контур ФК для задач наведення й злиття даних датчиків у високодинамічних умовах.

Формулювання завдання дослідження. Мета роботи – підвищення точності оцінювання стану високодинамічних апаратів у системах наведення та злиття даних датчиків шляхом розроблення та дослідження нейронного ФК (НФК), який поєднує його класичний варіант із нейромережевою корекцією.

Для досягнення мети необхідно розв’язати такі завдання:

- 1) побудувати дискретну математичну модель динаміки високодинамічного апарата й моделей вимірювань датчиків IMU / GNSS / MAG / CAM;
- 2) сформулювати обмеження застосування класичного ФК в умовах нелінійної динаміки й завад;
- 3) запропонувати структуру НФК, включно зі схемою злиття даних датчиків та інтерфейсом із системою наведення;
- 4) розробити алгоритм НФК, включаючи формування вхідного вектора ознак для нейронної мережі;
- 5) визначити архітектуру нейромережевого модуля, процедуру його навчання й інтеграцію з ФК;
- 6) провести імітаційне моделювання та виконати порівняльний аналіз НФК і класичного ФК за показниками точності та стійкості.

Виклад основного матеріалу

Структура системи злиття даних датчиків на основі НФК. У типовому датчиковому комплексі високодинамічного апарата використовуються IMU, приймач GNSS / GPS, магнітометр (MAG) та оптичний датчик (камера – CAM). Інтеграція й узгоджене оброблення даних цих датчиків дозволяє суттєво підвищити точність та завадостійкість навігації, однак вимагає застосування спеціалізованих алгоритмів злиття даних [1–4, 9–12, 16–18].

На рис. 1 показано структурну схему системи. Високодинамічний апарат генерує фізичний рух, який вимірюється датчиками. На основі вектора вимірювань

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_k^{IMU} \\ \mathbf{z}_k^{GPS} \\ \mathbf{z}_k^{MAG} \\ \mathbf{z}_k^{CAM} \end{bmatrix}$$

блок злиття даних на базі НФК формує оцінку стану $\hat{\mathbf{x}}_k^{NKF}$, що передається в систему наведення та керування.

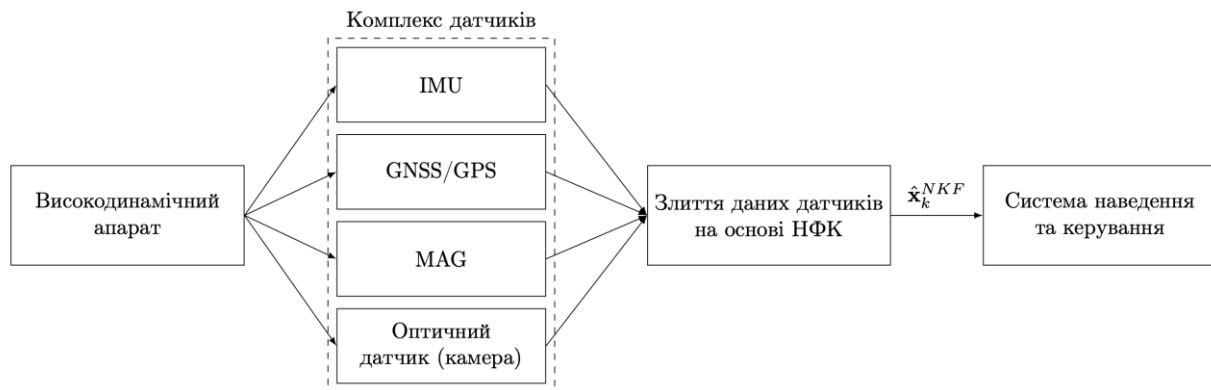


Рис. 1. Структура багатодатчикової системи злиття даних на основі НФК

Особливості оброблення даних оптичного каналу. Оптична камера в запропонованій структурі системи злиття даних не розглядається як джерело «сирих» зображень для безпосереднього введення у фільтр, а використовується як вимірювальний канал, що формує компактні вектори спостережень. На борту реалізується конвеєр попереднього оброблення кадрів, який включає корекцію дисторсії за результатами калібрування, нормалізацію яскравості та фільтрацію шуму для підвищення стабільності подальших обчислень. Після цього виконуються алгоритми виділення ключових точок або цілі (об'єкта відстеження) та їхнього трекінгу між сусідніми кадрами. Із використанням відомої внутрішньої орієнтації камери та геометричної моделі проєкції за положенням цілі в площині зображення відновлюється напрямок лінії візування в навігаційній системі координат або оцінюється відносний рух платформи. На основі цих оцінок формується вектор вимірювань оптичного каналу, який може містити, зокрема, кути напрямку на ціль або псевдовимірювання координат і швидкості носія. Якість кадру (кількість надійно трекованих ознак, середня похибка репроєкції) використовується для адаптивного налаштування коваріаційної матриці шуму оптичного каналу в структурі ФК, що підвищує стійкість системи до деградації зображення в умовах диму, опадів чи різких змін освітлення.

Математична модель динаміки та даних датчиків. Вектор стану високодинамічного апарата задається як $\mathbf{x}$

$$\mathbf{x}_k = [p_x \ p_y \ p_z \ v_x \ v_y \ v_z \ \theta \ \phi \ \varphi]^T,$$

де p_x, p_y, p_z – координати;

v_x, v_y, v_z – компоненти швидкості;

θ, ϕ, φ – кути тангажа, крену та курсу.

Дискретну модель процесу запишемо в такий спосіб:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{w}_k \approx N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_k), \quad (1)$$

де $\mathbf{F}_k$ – матриця переходу стану;

$\mathbf{B}_k$ – матриця керування;

$\mathbf{u}_k$ – вектор керуючих впливів;

$\mathbf{w}_k$ – шум процесу.

Для малих інтервалів дискретизації Δt матриця переходу стану $\mathbf{F}_k$, як правило, має блочно-трикутну структуру, у якій підматриці, що відповідають координатам і швидкостям, містять елементи з множником Δt .

Модель вимірювань має такий вигляд:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad \mathbf{v}_k \approx N(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k), \quad (2)$$

де $\mathbf{H}_k$ – матриця спостереження;

$\mathbf{R}_k$ – коваріація шуму вимірювань.

Блокова структура матриці $\mathbf{H}_k$ дозволяє виділити підматриці, що відповідають окремим підсистемам IMU, GNSS, MAG та CAM; наприклад, для датчика GNSS у відповідних рядках відображаються лише координати p_x, p_y, p_z .

Інерціальні вимірювання моделюються як

$$\mathbf{a}_m = \mathbf{a}_{true} + \mathbf{b}_a + \mathbf{n}_a, \quad \boldsymbol{\omega}_m = \boldsymbol{\omega}_{true} + \mathbf{b}_\omega + \mathbf{n}_\omega,$$

де $\mathbf{b}_a, \mathbf{b}_\omega$ – дрейф;

$\mathbf{n}_a, \mathbf{n}_\omega$ – шум.

Вимірювання GNSS запишемо як

$$\mathbf{p}_m^{GPS} = \mathbf{p}_{true} + \mathbf{n}_{gps},$$

а магнітометр – як

$$\mathbf{m}_m = \mathbf{R}(\theta, \phi, \varphi) \mathbf{m}_{earth} + \mathbf{n}_m,$$

де $\mathbf{R}(\theta, \phi, \varphi)$ – матриця повороту;

$\mathbf{m}_{earth}$ – вектор магнітного поля Землі.

Оптичний датчик (камера) описується загальною нелінійною функцією:

$$\mathbf{z}_k^{CAM} = \mathbf{h}_{cam}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_{cam}.$$

У результаті система «Процес – вимірювання» має суттєву нелінійність та змішані шуми, що обмежує ефективність класичного ФК.

Класичний ФК. Рекурсивні рівняння ФК складаються з етапів прогнозу та оновлення. Крок прогнозу:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k; \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{y}_k &= \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}; \\
\mathbf{S}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k; \\
\mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}; \\
\hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{y}_k; \\
\mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Позначимо $\hat{\mathbf{x}}_k^{KF} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ – оцінку стану після кроку оновлення ФК. Саме її в подальшому коригує нейронна мережа в складі НФК.

Структура НФК. На відміну від відомих deep Kalman filters (глибоких варіантів ФК) та нейромережових схем корекції параметрів фільтра, у запропонованому підході нейронна мережа використовується як надбудова над класичним ФК, що формує корекційний доданок $\Delta \mathbf{x}_k$ до оцінки $\hat{\mathbf{x}}_k^{KF}$. Така резидуальна структура дозволяє зберегти математичну прозорість та стійкість класичного ФК, одночасно компенсуючи нелінійні та контекстно залежні похибки за рахунок навчання на даних імітаційного моделювання [6, 9, 19–21].

На рис. 2 наведено структурну схему НФК. Класичний ФК приймає на вході вектори $\mathbf{u}_k$, $\mathbf{z}_k$, формує оцінку $\hat{\mathbf{x}}_k^{KF}$ і вектор інновації $\mathbf{y}_k$. Ці величини разом із вектором вимірювань $\mathbf{z}_k$ подаються на вхід нейронної мережі, яка обчислює корекційний доданок $\Delta \mathbf{x}_k$.



Рис. 2. Структура НФК як надбудови над класичним ФК

Вхідний вектор ознак для нейромережового модуля має такий вигляд:

$$\mathbf{u}_k^{NN} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_k^{KF} \\ \mathbf{z}_k \\ \mathbf{y}_k \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^m.$$

Нейронна мережа апроксимує відображення

$$\Delta \mathbf{x}_k = f_\theta(\mathbf{u}_k^{NN}),$$

де f_θ – багатошаровий перцептрон із параметрами θ .

Остаточну оцінку стану визначаємо як

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{NKF} = \hat{\mathbf{x}}_k^{KF} + \Delta \mathbf{x}_k. \quad (5)$$

Тобто НФК реалізує резидуальну корекцію: ФК забезпечує модельну основу, а нейронна мережа компенсує систематичні та нелінійні похибки. За рахунок резидуальної структури та компактної архітектури багатошарового перцептрона (Multi-Layer Perceptron – MLP) обчислювальна складність НФК зростає лише на додатковий порядок $\mathcal{O}(\mathbf{n}_{MLP})$ операцій множення-додавання, що є прийнятним для вбудованих процесорів реального часу.

Алгоритм НФК. Алгоритм роботи НФК наведено у вигляді блок-схеми (рис. 3). На кожному кроці дискретизації виконується певна послідовність дій.

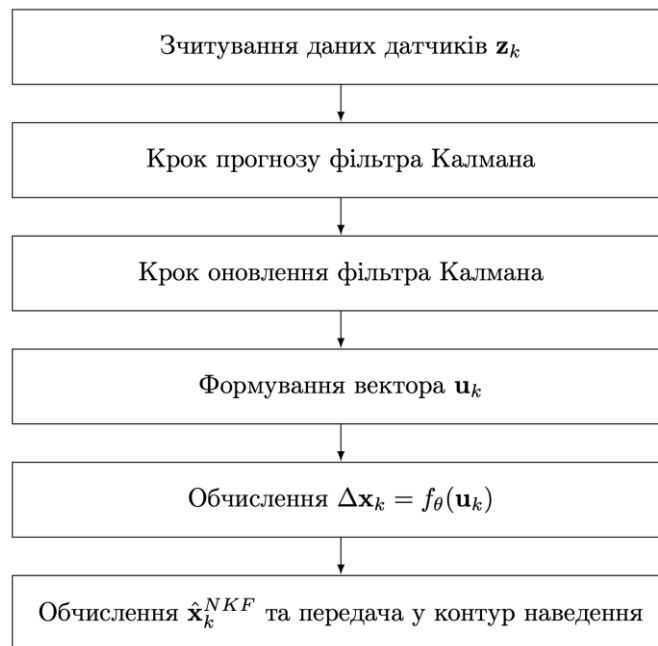


Рис. 3. Блок-схема алгоритму роботи НФК

Структура неймережевого модуля. Структуру неймережевого модуля в складі НФК наведено на рис. 4. Як апроксиматор корекційного доданка використано MLP із двома прихованими шарами, що формує вектор корекції стану $\Delta \mathbf{x}_k$.

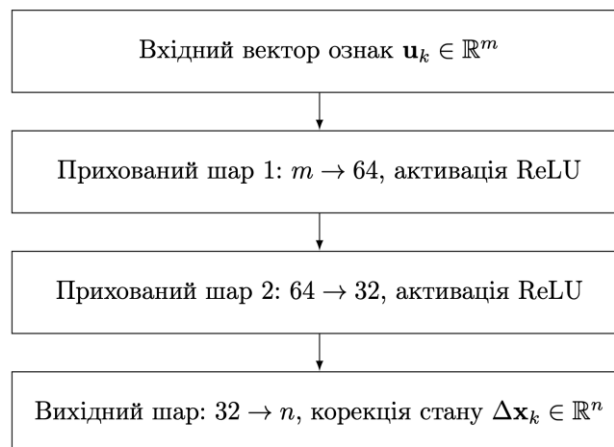


Рис. 4. Структура MLP в складі НФК (архітектура: $m \rightarrow 64 \rightarrow 32 \rightarrow n$)

Нехай розмір вхідного вектора ознак – m , а розмір вектора стану – n . Архітектура мережі має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1 &= \sigma_1(\mathbf{W}_1 \mathbf{u}_k^{NN} + \mathbf{b}_1); \\ \mathbf{h}_2 &= \sigma_2(\mathbf{W}_2 \mathbf{h}_1 + \mathbf{b}_2); \\ \Delta \mathbf{x}_k &= \mathbf{W}_3 \mathbf{h}_2 + \mathbf{b}_3, \end{aligned}$$

де $\sigma_1(\cdot)$, $\sigma_2(\cdot)$ – функції активації (ReLU);

$\mathbf{W}_i$, $\mathbf{b}_i$ – матриці ваг та вектори зсувів.

Типові розміри шарів

$$m \rightarrow 64 \rightarrow 32 \rightarrow n$$

забезпечують компроміс між точністю апроксимації та обчислювальною складністю.

Остаточна оцінка стану матиме такий вигляд:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^{NKF} = \hat{\mathbf{x}}_k^{KF} + \Delta \mathbf{x}_k.$$

Навчання мережі виконується офлайн на основі імітаційного моделювання. Як цільову функцію обрано середньоквадратичну похибку між істинним станом та оцінкою НФК:

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\| \mathbf{x}_k^{true} - \left(\hat{\mathbf{x}}_k^{KF} + f_{\theta}(\mathbf{u}_k^{NN}) \right) \right\|^2. \quad (6)$$

Оптимізація здійснюється методом Adam. Після навчання параметри фіксують, а в режимі реального часу НФК працює без подальшого донавчання, що відповідає обмеженням за ресурсами бортових процесорів.

Результати імітаційного моделювання. Імітаційне моделювання проводилося для кількох типових сценаріїв руху високодинамічного апарата:

- прямолінійного польоту зі сталою швидкістю;
- польоту з інтенсивними маневрами (зміна курсу та тангажа);
- сценарію з викидами у вимірюваннях GNSS (групові пропуски, шумові сплески);
- сценарію з підвищеними шумами IMU та деградацією оптичного каналу.

Для кожного випадку оцінюються такі параметри:

- середньоквадратична похибка (Root Mean Square Error – RMSE) координат $RMSE_p$;
- середньоквадратична похибка швидкостей $RMSE_v$;
- максимальне відхилення траєкторії;
- час обчислення одного кроку фільтрації.

Результати імітаційного моделювання узгоджуються з тенденціями, показаними в роботах із мультисенсорного злиття та нейронно-інтегрованих ФК [1–4, 9–12, 16, 19–21], і демонструють, що використання НФК дозволяє зменшити середньоквадратичну похибку оцінювання координат та швидкостей на 15–40% порівняно з класичним ФК. Для сценарію інтенсивних маневрів RMSE координат за горизонталлю зменшується з 12,4 м

(ФК) до 7,1 м (НФК), а похибка швидкості – з 1,8 м/с до 1,1 м/с. У сценарії з викидами GNSS максимальне відхилення траєкторії зменшується приблизно з 65 м до 38 м, що свідчить про більш гладку траєкторію та менше відхилення від істинного положення.

Час обчислення кроку НФК перевищує час роботи класичного ФК лише на 10–20% завдяки компактності MLP, що підтверджує можливість реалізації алгоритму на вбудованих платформах реального часу.

Практичні аспекти реалізації. Запропонований підхід до побудови НФК нежорстко прив'язаний до конкретного типу носія чи елементної бази і може бути реалізований на типовій вбудованій обчислювальній платформі, яка забезпечує виконання алгоритмів оцінювання стану та базового оброблення зображень у режимі реального часу. Вимоги до бортового обчислювача визначаються розмірністю вектора стану та частотою оновлення ФК: для вектора стану розмірності $n \approx 10\text{--}20$ та частоти оновлення 50–100 Гц достатньо модулів, що забезпечують виконання порядку $10^6\text{--}10^7$ арифметичних операцій за один цикл. Нейронна складова НФК представлена компактним багатошаровим перцептроном з одним-двома прихованими шарами, що також не потребує надлишкових обчислювальних ресурсів. Датчиковий комплекс включає інерціальний вимірювальний модуль, приймач глобальної навігаційної супутникової системи, магнітометр та оптичну камеру, які належать до типових вимірювальних засобів сучасних високодинамічних рухомих платформ. Отже, реалізація НФК можлива на наявній номенклатурі вбудованих обчислювальних засобів без жорстких вимог до використання спеціалізованих високопродуктивних процесорів.

Висновки. Виконано аналіз можливостей застосування класичного ФК для оцінювання стану високодинамічних апаратів із багатодатчиковим забезпеченням (IMU, GNSS, MAG, CAM). Показано, що за умов нелінійної динаміки та наявності викидів у вимірюваннях датчиків традиційні схеми фільтрації забезпечують недостатню точність.

Запропоновано структуру НФК, у якій ФК виконує роль модельного ядра, а нейронна мережа формує корекційний вектор $\Delta \mathbf{x}_k$ на основі оцінки ФК, інновації та вектора вимірювань.

Розроблено алгоритм НФК і показано, що завдяки резидуальній структурі $\hat{\mathbf{x}}_k^{NKF} = \hat{\mathbf{x}}_k^{KF} + \Delta \mathbf{x}_k$ нейромережевий модуль може бути реалізований у вигляді компактного MLP, придатного для бортових процесорів.

Результати імітаційного моделювання свідчать про зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат та швидкостей на 15–40% порівняно з класичним ФК, а також про підвищення стійкості до викидів у вимірюваннях GNSS та підвищеного шуму IMU.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію рекурентних архітектур простору станів (state-space архітектур), зокрема мереж довгої короткочасної пам'яті (Long Short-Term Memory), керованих рекурентних блоків (Gated Recurrent Unit) та Mamba-подібних моделей, у структуру НФК, а також на використання адаптивних стратегій налаштування коваріацій шумів і параметрів ФК у реальному часі, що відповідає сучасним тенденціям розвитку гібридних систем оцінювання стану [6, 9, 15, 19–22]. За матеріалами цієї роботи подано заявку на винахід України № а202506585, а подальші дослідження спрямовано на експериментальну апробацію та адаптацію під обмежені бортові ресурси.

Окремим напрямом є експериментальна апробація запропонованого алгоритму на реальних зразках озброєння та військової техніки. Передбачається реалізація НФК на бортових обчислювальних модулях із обмеженими ресурсами та відпрацювання алгоритму в умовах полігонних випробувань із застосуванням реальних сценаріїв дії засобів РЕБ, дезінформації та часткової втрати даних датчиків.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Використання фільтра Калмана для інтеграції даних GPS та IMU в зашумленому середовищі / Є. Б. Артамонов, А. К. Жултинська, Т. І. Залозний та ін. // Технічна інженерія. 2024. Т. 2 (94). С. 69–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-69-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-69-80)
2. Раєвський М. В. Адаптивна фільтрація параметрів руху об'єкта у горизонтальній площині // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». 2010. № 686. С. 224–233.
3. Зімчук І. В., Шапар Т. М. Параметричний синтез алгоритмів фільтрації для інерціальних навігаційних систем безпілотних літальних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2025. Вип. 28 (І). С. 37–50. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.04>
4. Воловик А. Ю., Гаврілов Д. В. Апроксимація розширеного фільтра Калмана паралельною двокаскадною структурою // Вісник Вінницького політехніч. ін-ту. 2019. № 4. С. 107–115. . <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-145-4-107-115>
5. Алгоритм формування набору апіорних даних нейронної мережі для обробки цифрових аерознімків / С. В. Ковбасюк, Р. М. Осадчук, М. П. Романчук, Л. М. Наумчак // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2022. Вип. 23. С. 77–88. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.06>
6. Клименко А. М. Порівняльний аналіз фільтра Калмана та фільтра «ковзке середнє» // 36. матеріалів XVI Всеукр. наук.-практ. конф. («Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні»), (8–9 груд. 2020 р., м. Київ). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 25–28.
7. Водяник Б. Р., Лорія М. Г., Дуришев О. А. Застосування фільтра Калмана для моніторингу газової фази та управління каталітичними процесами у виробництві аміаку // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. 2025. Т. 288 (2). С. 56–60.
8. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
9. Kalman R. E., Bucy R. S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83, No. 1. P. 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>
10. Brown R. G., Hwang P. Y. C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. (3rd ed.). New York : John Wiley & Sons, 1997. 504 p.
11. Grewal M. S., Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB. (4th ed.). Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015. 639 p.
12. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2006. 554 p.

13. Haykin S. (Ed.). Kalman Filtering and Neural Networks. New York : John Wiley & Sons, 2001. 302 p.
14. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter // Technical Report TR 95-041. University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
15. El-Sheimy N., Shin E.-H., Niu X. Kalman Filter Face-Off: Extended vs. Unscented Kalman Filters for Integrated GPS and MEMS Inertial Navigation // Inside GNSS. 2008. Vol. 3, No. 2. P. 48–54.
16. Krishnan R. G., Shalit U., Sontag D. Deep Kalman Filters // Advances in Approximate Bayesian Inference Workshop (NIPS–2015). 2015. arXiv:1511.05121. URL: <https://arxiv.org/abs/1511.05121> (last accessed: 10.11.2025).
17. Sensor Fusion of GNSS and IMU Data for Robust Localization via Smoothed Error State Kalman Filter / Yin Y., Zhang J., Guo M., et al. // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. Article 3676. <https://doi.org/10.3390/s23073676>
18. Invariant Observer-Based State Estimation for Micro Aerial Vehicles in GPS-Denied Indoor Environments Using an RGB-D Camera and MEMS Inertial Sensors / Li D., Li Q., Tang L., et al. // Micromachines. 2015. Vol. 6, No. 4. P. 487–522. <https://doi.org/10.3390/mi6040487>
19. Farrell J. A. Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors. New York : McGraw–Hill, 2008. 554 p.
20. Aburasain Y., Bilal M., Kim K. Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems Through Neural Network Integration with Kalman and Alpha–Beta Filters // PLOS ONE. 2024. Vol. 19, No. 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>
21. Zhang Y., Meng Yu & Zhang H., et al. Neural Kalman: A Learnable Kalman Filter for Acoustic Echo Cancellation. In *IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU)*. 2023. <https://doi.org/10.1109/asru57964.2023.10389780>
22. Zhang Y., Zhang H., & Meng Yu, et al. Neural Network Augmented Kalman Filter for Robust Acoustic Howling Suppression. In *Proc. Interspeech*, 1715–1719. 2024. <https://doi.org/10.21437/interspeech.2024-166>
23. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. Vol. 39, No. 4. P. 1333–1364. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132>
24. Навчально-тренувальна система для підготовки операторів безпілотних авіаційних комплексів / І. А. Пількевич, А. М. Токар, О. В. Франжі, Р. І. Лобода // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2021. Вип. 20. С. 83–97. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.08>
25. Нагорнюк О. А. База даних для автоматизованого розпізнавання типу безпілотного авіаційного комплексу за його радіосигналами // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2023. Вип. 25 (І). С. 39–49. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.04>
26. Бугайов М. В. Оптимізація швидкості польоту безпілотного літального апарата під час ведення радіомоніторингу // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2025. Вип. 28 (І). С. 5–15. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.01>

27. Гуменюк І. В., Рибчинський Д. А. Формалізована постановка наукового завдання з оптимізації польоту та управління безпілотних авіаційних комплексів під час використання повітряних ретрансляторів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2025. Вип. 28 (І). С. 26–36. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.03>
28. Туряниця М., Четверіков Б. Застосування фільтра Калмана для уточнення даних ГНСС-знімання з урахуванням спуфінгу // Вісник Львів. політехніки. 2025. Вип. 49. С. 61–70.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. Artamonov, Ye. B., Zhultynska, A. K., & Zaloznyi, T. I. et al. (2024). Vykorystannia filtra Kalmana dlia intehtratsii danykh GPS ta IMU v zashumlenomu seredovyshchi [Application of the Kalman Filter for Integration of GPS and IMU Data in a Noisy Environment]. *Tekhnichna inzheneriia [Technical Engineering]*, 2 (94), 69–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-69-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-69-80) [in Ukrainian].
2. Raievskiy, M. V. (2010). Adaptivna filtratsiia parametriv rukhu ob'iektu u horyzontalnii ploshchyni [Adaptive Filtering of the Parameters of Object Motion in the Horizontal Plane]. *Visnyk Nats. un-tu «Lvivska politekhnika». Serii «Komp'uterni nauky ta informatsiini tekhnologii» [Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic. Series "Computer Science and Information Technologies"]*, 686, 224–233 [in Ukrainian].
3. Zimchuk, I. V., & Shapar, T. M. (2025). Parametrychnyi syntez alhorytmiv filtratsii dlia inertsiialnykh navihatsiinykh system bezpilotnykh litalnykh aparativ [Parametric Synthesis of Filtering Algorithms for Inertial Navigation Systems of Unmanned Aircraft]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 28 (I), 37–50. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.04> [in Ukrainian].
4. Volovyk, A. Yu., Havrilov, D. V. (2019). Aproksymatsiia rozshyrenoho filtra Kalmana paralelnoiu dvokaskadnoiu strukturoiu [Approximation of the Extended Kalman Filter by a Parallel Two-Stage Structure]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnich. in-tu [Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute]*, 4, 107–115. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-145-4-107-115> [in Ukrainian].
5. Kovbasiuk, S. V., Osadchuk, R. M., Romanchuk, M. P., & Naumchak, L. M. (2022). Alhorytm formuvannia naboru apriornykh danykh neironnoi merezhi dlia obrobky tsyfrovyykh aeroznimkiv [An Approach to Forming a Prior Dataset of Neural Network for Processing Digital Aerial Photos]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 23, 77–88. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.06> [in Ukrainian].
6. Klymenko, A. M. (2020). Porivnialnyi analiz filtra Kalmana ta filtra «kovzke serednie» [Comparative Analysis of the Kalman Filter and the Moving Average Filter]. In *Zb. materialiv* 136

XVI Vseukr. nauk.-prakt. konf. («Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh rishen u pryladobuduvanni») [Proceedings of the XVI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (“Efficiency and Automation of Engineering Solutions in Instrument Making”)]. Kyiv, December 8–9, 2020. (pp. 25–28). Kyiv [in Ukrainian].

7. Vodianyk, B. R., Loria, M. H., & Duryshch, O. A. (2025). Zastosuvannia filtra Kalmana dlia monitorynhu hazovoi fazy ta upravlinnia katalitychnymy protsesamy u vyrobnytstvi amiaku [Application of the Kalman Filter for Monitoring the Gas Phase and Controlling Catalytic Processes in Ammonia Production]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia* [Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dal], 288 (2), 56–60 [in Ukrainian].

8. Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82, 1, 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>

9. Kalman, R. E., & Bucy, R. S. (1961). New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. *Journal of Basic Engineering*, 3, 1, 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>

10. Brown, R. G., & Hwang, P. Y. C. (1997). *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.

11. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2015). *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*. (4th ed.). Hoboken, New York: John Wiley & Sons.

12. Simon, D. (2006). *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches*. Hoboken, New York: John Wiley & Sons.

13. Haykin, S. (2001). *Kalman Filtering and Neural Networks*. New York: John Wiley & Sons.

14. Welch, G., & Bishop, G. (1995). An Introduction to the Kalman Filter. *Technical Report TR 95-041*. University of North Carolina at Chapel Hill.

15. El-Sheimy, N., Shin, E. – H., & Niu, X. (2008). Kalman Filter Face-Off: Extended vs Unscented Kalman Filters for Integrated GPS and MEMS Inertial Navigation. *Inside GNSS*, 3, 2, 48–54.

16. Krishnan, R. G., Shalit, U., & Sontag, D. (2015). Deep Kalman Filters // *Advances in Approximate Bayesian Inference Workshop (NIPS-2015)*. arXiv:1511.05121. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1511.05121> (last accessed: 10.11.2025).

17. Yin, Y., Zhang, J., & Guo, M., et al. (2023). Sensor Fusion of GNSS and IMU Data for Robust Localization via Smoothed Error State Kalman Filter. *Sensors*, 23, 7. Article 3676. <https://doi.org/10.3390/s23073676>

18. Li, D., Li, Q., & Tang, L., et al. (2015). Invariant Observer-Based State Estimation for Micro Aerial Vehicles in GPS-Denied Indoor Environments Using an RGB-D Camera and MEMS Inertial Sensors. *Micromachines*, 6, 4, 487–522. <https://doi.org/10.3390/mi6040487>

19. Farrell, J. A. (2008). *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. New York: McGraw – Hill.

20. Aburasain, Y., Bilal, M., & Kim, K. (2024). Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems Through Neural Network Integration with Kalman and Alpha–Beta Filters. *PLOS ONE*, 19, 10, e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>

21. Zhang, Y., Meng, Yu, & Zhang, H., et al. (2023). Neural Kalman: A Learnable Kalman Filter

for Acoustic Echo Cancellation. In *IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU)*. <https://doi.org/10.1109/asru57964.2023.10389780>

22. Zhang, Y., Zhang, H., & Meng, Yu, et al. (2024). Neural Network Augmented Kalman Filter for Robust Acoustic Howling Suppression. In *Proc. Interspeech*, 1715–1719. <https://doi.org/10.21437/interspeech.2024-166>

23. Li, X. R., & Jilkov, V. P. (2003). Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 39, 4, 1333–1364. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132>

24. Pilkevych, I. A., Tokar, A. M., Franzhi, O. V., Loboda, R. I., & Dmytruk, V. V. (2021). Navchalno-trenuvanna systema dlia pidhotovky operatoriv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv [A Training System for Preparing Operators of Aerial Vehicle Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 20, 83–97. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.08> [in Ukrainian].

25. Nahorniuk, O. A. (2023). Baza danykh dlia avtomatyzovanoho rozpiznavannia typu bezpilotnoho aviatsiinoho kompleksu za yoho radiosyhnalamy [Data Base of Radio Signals of Unmanned Aviation Complexes]. *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), 39–49. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.04> [in Ukrainian].

26. Buhaiov, M. V. (2025). Optyimizatsiia shvydkosti polotu bezpilotnoho litalnoho aparata pid chas vedennia radiomonitorynhu [Unmanned Aerial Vehicle Flight Speed Optimization for Spectrum Sensing]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 28 (I), 5–15. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.01> [in Ukrainian].

27. Humeniuk, I. V., & Rybchynskyi, D. A. (2025). Formalizovana postanovka naukovooho zavdannia z optyimizatsii polotu ta upravlinnia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv pid chas vykorystannia povitrianykh retransliatoriv [Statement of the Scientific Task for Optimizing Flight and Control of Unmanned Aerial Systems Using Airborne Repeaters]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 28 (I), 26–36. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.03> [in Ukrainian].

28. Turianytsia, M., & Chetverikov, B. (2025). Zastosuvannia filtra Kalmana dlia utochnennia danykh HNSS-znimannia z urakhuvanniam spufinhu [Application of the Kalman Filter to Refine GNSS Survey Data Taking into Account Spoofing]. *Visnyk Lviv. Politekhniky [Bulletin of Lviv Polytechnic]*, 49, 61–70 [in Ukrainian].

V. A. Romanko, O. M. Sribnyi

INTEGRATION OF A NEURAL KALMAN FILTER INTO GUIDANCE OF HIGH-DYNAMIC PLATFORMS

The paper addresses the problem of improving the accuracy of state estimation for high-dynamic platforms such as unmanned aerial vehicles, robotic ground platforms and guided munitions by integrating methods of artificial intelligence into the structure of the Kalman filter. It is shown that the classical Kalman filter, despite its wide use in guidance and navigation systems, has significant limitations under nonlinear dynamics, non-Gaussian noise and the presence of gross errors in sensor data.

A hybrid approach is proposed in which the classical Kalman filter is supplemented by a neural network that forms an adaptive correction of the state estimate. A mathematical model of multi-sensor data fusion is developed that integrates measurements of inertial measurement units, satellite navigation receivers, magnetometers and optical cameras.

The structure of the proposed algorithm, the formation of the input vector for the neural network, the training procedure based on numerical simulation and the use of the corrected estimate in guidance and stabilization loops are described. Simulation results show a reduction of approximately 15–40% in the root-mean-square error of position and velocity estimates compared with the classical Kalman filter, together with increased robustness to outliers in satellite measurements and elevated noise in inertial sensors. The possibility of implementing the proposed algorithm on on-board computing modules with limited resources is substantiated. Further research should be directed towards the integration of recurrent state-space architectures, in particular Long Short-Term Memory networks, Gated Recurrent Unit networks, and Mamba-like models into the structure of the neural Kalman filter.

Keywords: *Kalman filter; neural Kalman filter; sensor data fusion; inertial navigation; unmanned aerial vehicle; guided munition; artificial intelligence; guidance of high-dynamic platforms.*

І. С. Мещеряков, А. А. Нікітін, І. О. Капля, А. В. Залізко, С. П. Буряк

МОДЕЛЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРОЗДІЛІВ АЕРОЗОЛЬНОГО МАСКУВАННЯ В ОБОРОНІ ЗА СТАНДАРТАМИ НАТО

У статті розглянуто актуальну проблему формалізації процесів застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні відповідно до стандартів НАТО. Вихідні керівні документи, що регламентують використання аерозольних засобів, визначають загальні принципи, однак їх практична реалізація в умовах бойових дій потребує високого ступеня узгодженості дій під час аерозольного маскування. Ефективне застосування аерозольного маскування є критичним елементом збереження бойової спроможності підрозділів в умовах сучасної високоточної зброї та розвинених засобів розвідки, спостереження й цілевизначення противника.

Метою дослідження є розроблення моделі застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні за стандартами НАТО, яка забезпечує наукове обґрунтування процесів планування, управління та контролю за ефективністю маскувальних заходів у бойових умовах. Вона відповідає принципам стандартизації НАТО, передбачає інтеграцію в автоматизовані системи управління військами та може бути використана під час планування оборонних дій.

Розроблений підхід дозволяє формалізувати процес прийняття рішення щодо моменту активації завіси, її тривалості, інтенсивності та оптимального розподілу засобів аерозольного маскування на місцевості. Важливо, що модель враховує мультиспектральну природу сучасних засобів розвідки противника, а також вимоги до забезпечення прихованості маневру та зниження інформаційної доступності позицій оборони.

Практичний результат дослідження полягає в отриманні алгоритму керування засобами аерозольного маскування, придатного до автоматизації та впровадження в сучасні системи бойового управління. Запропонована модель підвищує ефективність оборонних дій завдяки можливості прогнозувати щільність аерозольної завіси, оцінювати очікувані втрати щільності внаслідок зміни метеоумов, здійснювати адаптивну корекцію продуктивності.

Отже, результати дослідження створюють наукове обґрунтування процесів планування, управління й контролю за ефективністю маскувальних заходів у бойових умовах. Запропонована модель відповідає принципам стандартизації НАТО, передбачає інтеграцію в автоматизовані системи управління військами та може бути використана під час планування оборонних дій.

Ключові слова: оборона; аерозольне маскування; аерозольна протидія; димові засоби; тактика; модель; ризик; захист; ефективність.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Виходячи з чинних керівних документів щодо застосування підрозділів аерозольного маскування за стандартами

© І. С. Мещеряков, А. А. Нікітін, І. О. Капля, А. В. Залізко, С. П. Буряк, 2025

НАТО [1, 2], можна стверджувати, що на сьогодні є потреба в узгодженості дій під час сумісних навчань або бойових дій [3]. Для більшого розуміння їх значущості запропоновано побудувати відповідну модель застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні (далі – Модель оборони), метою створення якої можна визначити оптимізацію процесів аерозольного маскування в обороні [3, 4].

Оборонні операції дозволяють утримати позиції, виграти час, позбавити противника доступу до місцевості та завдати шкоди або розгромити його сили наступу [3, 13]. Застосування аерозольного маскування збільшує можливості командира зривати атаки противника, перехоплювати ініціативу та спрямовувати всю свою бойову потужність у потрібний момент й у визначеному місці для здобуття перемоги [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій [5–12] свідчить, що аерозольне маскування забезпечує підтримку для будь-якого типу оборонної операції. У разі правильного використання аерозольне маскування нівелює будь-яку початкову перевагу противника. Інтегроване у всій оборонній структурі, воно суттєво порушує синхронізацію противника, створюючи вікна можливостей для наших військ перехопити ініціативу та встановити умови бою [3, 14].

Основне завдання аерозольного маскування під час оборони полягає в тому, щоб перешкодити роботі засобам цілевизначення і розвідки противника [14, 15], а також приховати маневрені сили і сили підтримки [1]. Наша мета – позбавити противника інформації про дислокацію та склад наших сил, що дозволить нам виграти час, зосередити сили в іншому місці, контролювати ключові та інші важливі ділянки місцевості й виснажити сили противника на етапі підготовки до наступальних операцій.

Не вирішені раніше частини загальної проблеми, яким присвячено статтю:

наявні підходи до застосування засобів аерозольного маскування мають емпіричний або частково регламентований характер, без чіткої математичної моделі управління;

відсутність єдиної моделі не дозволяє формалізувати процес прийняття рішень, оцінити ефективність маскування в реальному часі та автоматизувати управління.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення формалізованої моделі застосування підрозділів аерозольного маскування за стандартами НАТО, яка передбачає інтеграцію оцінки ризику, метеофакторів, ресурсного стану генераторів та оперативної потреби у створенні аерозольної завіси. Модель розглядається як керована адаптивна система, що функціонує на основі порогових значень ризику та алгоритмічного вибору режиму маскування. Запропоновано структурований підхід до опису системи через простір станів, керуючу функцію та динамічні рівняння, що відображають зміну ресурсів і параметрів аерозольної хмари. Наведено математичні залежності, які визначають продуктивність генераторів відповідно до швидкості вітру, запасу ресурсів та необхідного рівня маскування, а також алгоритм роботи системи в циклі реального часу.

Виклад основного матеріалу. Виходячи із загальних положень застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні за стандартами НАТО [1, 3] Модель оборони розглядаємо як керовану систему з адаптивним порогом активації, де головна мета – максимізація часу маскування (t_{min}) за мінімізації вартості (Q_{cost}) [16].

Система постійно обробляє вхідний вектор загрози, який визначає необхідність застосування підрозділів аерозольного маскування:

$$V = \{R(E), M_u, T_{\text{запас}}\}, \quad (1)$$

де $R(E)$ – ризик, інтегральна оцінка загрози від мультиспектральних засобів (w_1, w_2, w_3) . Якщо $R(E) > R_{\text{активації}}$ (наприклад, 0,4), то потрібна активація;

M_u – вітер, його швидкість і напрямок. Якщо $M_u > M_u^{\text{крит}}$ ($M_u > 15$) км/год, то ефективність зависе критично знижується, тому потрібний перехід на артилерію;

$T_{\text{запас}}$ – запас палива / суміші в генераторах. Якщо $T_{\text{запас}}^{\text{мін}} < 2$ год роботи, то система обмежує тривалість маскування.

Система завжди перемикається на найвищий необхідний режим і повертається до пасивної готовності лише після того, як $R(E)$ тримається нижче 0,4 протягом $T_{\text{очищення}}$ (час, необхідний для повного розсіювання аерозолі).

Вибір операційного режиму генераторів є функцією ризику $R(E)$ та критичності маскувальної цілі [16].

Під час оборони витрати мають критичне значення, тому вводимо індекс ефективності ресурсів $I_{\text{ресурс}}$:

$$I_{\text{ресурс}} = \frac{T_{\text{досягнутий}}}{T_{\text{запланованій}}} \frac{Q_{\text{запланованій}}}{Q_{\text{фактичний}}} K_{\text{вартість}}, \quad (2)$$

де $\frac{T_{\text{досягнутий}}}{T_{\text{запланованій}}}$ – наскільки точно генератор виконав завдання в часі;

$\frac{Q_{\text{запланованій}}}{Q_{\text{фактичний}}}$ – наскільки ефективно була витрачена мультиспектральна суміш;

$K_{\text{вартість}}$ – ваговий коефіцієнт, якщо в режимі 4 (антиудар) ціль була врятована, то $K_{\text{вартість}}$ може бути ≥ 1 , що підвищує загальну оцінку ефективності.

Якщо $I_{\text{ресурс}}$ падає нижче 0,7, то система сигналізує про необхідність технічного обслуговування генераторів або переоцінювання їхнього розміщення (це означає, що вітер постійно зносить аерозоль) [17].

Модель застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні – це не просто команда «Пуск», а динамічний наказ, який постійно оновлюється [18]:

$$D = \{R_{\text{координати}}, R_{\text{продуктивність}}, R_{\text{тривалість}}\}, \quad (3)$$

Стійкість системи ґрунтується на постійному виконанні заходів і зворотному зв'язку: метеомоніторинг, за якого система отримує дані про M_u кожні 15 хв;

дронів перевірка щільності аерозольної завіси, коли крізь мультиспектральну аерозольну завісу за допомогою бортових тепловізорів запускають безпілотні літальні апарати (БПЛА) (невеликі квадрокоптери) для моніторингу $C_{\text{крит}}^{\text{Тепловий}}$ [14, 16, 19];

адаптація продуктивності: якщо M_u зростає, то система автоматично збільшує $R_{\text{продуктивність}}$ (потік аерозолеутворювальних речовин (АУР)) для компенсації розсіювання (залишаючись у межах обраного режиму) [20]; якщо $C_{\text{крит}}^{\text{Тепловий}}$ досягнуто, система може тимчасово знизити $R_{\text{продуктивність}}$ для економії [16], доки $R(E)$ залишається високим.

Модель оборони перетворює застосування генераторів в обороні на саморегульовану, економічно обґрунтовану і високотехнологічну операцію, що забезпечує підвищення живучості військам із застосуванням аерозолів тривалий час [3, 16].

Формалізацію Моделі в обороні проводимо шляхом її описування за допомогою простору станів та керуючої функції.

Простір станів системи (S) можна уявити як їх сукупність у момент часу t як вектор ключових змінних, що описують і наші ресурси, і загрозу:

$$S(t) = \{R(E)_t, M_{u,t}, Q_{\text{res},t}, C_{\text{tar},t}\}, \quad (4)$$

де $R(E)_t$ – інтегральна оцінка ризику від мультиспектральних загроз, (0,1);

$M_{u,t}$ – швидкість вітру (ключовий фактор розсіювання), м/с;

$Q_{\text{res},t}$ – залишковий ресурс (паливо / суміш) у всіх генераторах, години роботи;

$C_{\text{tar},t}$ – фактична щільність аерозолів на цілі (моніторинг БПЛА), $C_{\text{крит}}^{\text{Тепловий}}$.

Керуюча функція Φ визначає вибір режиму роботи D_t та продуктивність генераторів P_t на основі поточного стану $S(t)$ [16, 18]:

$$\Phi: S(t) \rightarrow \{D_t, P_t\}, \quad (5)$$

де D_t – функція вибору режиму;

P_t – функція продуктивності генераторів.

Вибір режиму роботи $D_t \in \{1, 2, 3, 4\}$ здійснюється за допомогою порогової функції від ризику:

$$D_t = \begin{cases} 4, \text{ якщо } R(E)_t \geq R_{\text{max}} (\text{аниудар}); \\ 3, \text{ якщо } R_{\text{med}} \leq R(E)_t < R_{\text{max}} (\text{динамічнеосліплення}); \\ 2, \text{ якщо } R_{\text{min}} \leq R(E)_t < R_{\text{med}} (\text{економічнемаскування}); \\ 1, \text{ якщо } R(E)_t < R_{\text{min}} (\text{пасивнаготовність}), \end{cases} \quad (6)$$

де $R_{\text{max}} = 0,8$; $R_{\text{med}} = 0,6$; $R_{\text{min}} = 0,4$ – приклади порогових значень [21].

Функція продуктивності генераторів (P_t) (витрата суміші на генератор за одиницю часу) є адаптивною і залежить від обраного режиму, вітру [17] та запасу ресурсів [2]:

$$P_t = P_{base}(D_t) K_u K_{res}, \quad (7)$$

де $P_{base}(D_t)$ – базова продуктивність. Фіксована витрата для досягнення цільового C_{krit} у цьому режимі (наприклад, $P_{base}(4) = 5$ кг/хв, $P_{base}(2) = 2$ кг/хв);

K_u – коефіцієнт корекції вітру (адаптація), який компенсує розсіювання аерозолі через вітер:

$$K_u = 1 + \max\left(0, \frac{M_{u,t} - M_{u,base}}{M_{u,base}}\right). \quad (8)$$

Якщо вітер сильніший за базовий ($M_{u,base}$), то витрата збільшується пропорційно [17].

K_{res} – коефіцієнт обмеження ресурсу (захист), який запобігає повній витраті ресурсу, якщо $T_{зпас}$ критично малий, а саме:

$$K_{res} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } Q_{res,t} \geq Q_{res}^{min}; \\ 0,5, & \text{якщо } Q_{res,t} < Q_{res}^{min} \text{ (обмеження продуктивності)}. \end{cases} \quad (9)$$

Стан системи динамічний, постійно змінюється (оновлюється) завдяки зворотному зв'язку та фізичним процесам [17, 20].

Динаміка залишкового ресурсу ($Q_{res,t+1}$) полягає в його зменшенні відповідно до загальної продуктивності всіх генераторів ($N_{ген} P_t$):

$$Q_{res,t+1} = Q_{res,t} - (N_{ген} P_t \Delta t). \quad (10)$$

Динаміка фактичної щільності аерозольної хмари на цілі ($C_{tar,t+1}$) свідчить про її залежність від генерації, розсіювання та вітру [17, 20], це коло зворотного зв'язку [16]:

$$C_{tar,t+1} = C_{tar,t} + G(P_t) - L(C_{tar,t}, M_{u,t}) + \varepsilon_t, \quad (11)$$

де $G(P_t)$ – функція, що описує приріст щільності від продуктивності P_t (генерація);

$L(C_{tar,t}, M_{u,t})$ – функція, що описує втрати щільності, яка прямо пропорційна C_{tar} та швидкості вітру M_u (наприклад, $L \propto C_{tar} M_u$).

Така формалізація перетворює тактичні правила на систему диференціальних (або різницевих) рівнянь, які можна вирішувати за допомогою комп'ютерних симуляцій [10]. Вона дозволяє штабу не просто «запускати аерозоль», а математично обґрунтовувати кожен кілограм мультиспектрального аерозолі [22].

Сформулюємо чіткий, покроковий алгоритм керування генераторами в обороні на основі нашої формалізованої Моделі в обороні [16]. Цей алгоритм є керуючою функцією Φ [18], яка виконується в штабі з фіксованим часовим кроком (наприклад, кожні 5 хв).

Алгоритм керування генераторами аерозолію в обороні

1. Ініціалізація ($T = 0$):

встановити порогові показники, визначити значення R_{max} , R_{med} , R_{min} та Q_{res}^{min} (критичний запас палива);

розгорнути генератори: розмістити N_{gen} генераторів у запланованих точках $R_{координати}$ та ввести їхні початкові $Q_{res,0}$ у систему.

2. Цикл керування (кожні Δt хв)

Крок 1. Збір та оновлення стану ($S(t)$), коли система отримує актуальні дані:

розвідка ($R(E)$) – оцінка $R(E)_t$ на основі звітів розвідки (аналіз польотів БПЛА, активності тепловізорів ворога);

метеодані (M_u) – отримання поточної швидкості вітру $M_{u,t}$;

логістика (Q_{res}) – оновлення $Q_{res,t}$ на основі даних із датчиків генераторів;

моніторинг (C_{tar}) – отримання $C_{tar,t}$ (фактична щільність аерозолію) із дронавої розвідки.

Крок 2. Визначення режиму та продуктивності, коли система обчислює необхідний режим та потужність:

вибір режиму (D_t). Для визначення одного з чотирьох режимів аерозольного маскування застосовується порогова функція

$$D_t = \Phi_{режим}(R(E)_t); \quad (12)$$

обмеження ресурсу K_{res} . Система автоматично знижує K_{res} до 0,5 (або 0,3) незалежно від $R(E)$, якщо $Q_{res,t} < Q_{res}^{min}$;

корекція вітру K_u . Для компенсації розсіювання аерозолію розраховується K_u ;

розрахунок необхідної продуктивності (P_t) здійснюється з урахуванням усіх факторів.

Крок 3. Рішення на початок аерозольного маскування є вихідним вектором D , коли надходить команда на початок аерозольного маскування [18]:

надходження команди. Для кожного генератора j : «Почати маскування» або «Підтримувати маскування» з новою швидкістю потоку, що відповідає P_t . Якщо $D_t = 1$ (пасивна готовність), надходить команда: «Припинити маскування»;

перевірка критичного вітру. Негайна команда «Припинити маскування» і перейти до резервного плану (наприклад, вогонь димовими снарядами), якщо $M_{u,t} > M_u^{крит}$ (наприклад, 15 м/с).

Крок 4. Зворотний зв'язок та адаптація, коли здійснюється контроль щільності (C_{tar}):

порівнюється фактична щільність $C_{tar,t}$ із цільовим $C_{крит}(D_t)$ для поточного режиму. Якщо $C_{tar,t}$ занадто низький, незважаючи на високу P_t , система ініціює команду «Переоцінка розміщення» або «Технічне обслуговування» генераторів;

здійснюється логістична сигналізація, коли система видає пріоритетну команду на поповнення палива / АУР, якщо Q_{rest} наближається до Q_{res}^{min} .

Висновки. На основі проведеного дослідження, спрямованого на формалізацію та оптимізацію тактики застосування підрозділів аерозольного маскування Збройних Сил України відповідно до стандартів НАТО, досягнуто значних результатів інтеграції військової тактики з методами прикладного математичного моделювання.

Розроблена алгоритмічна імітаційна модель застосування підрозділів аерозольного маскування в обороні забезпечує двоконтурну оптимізацію оборонних дій:

ресурсний контур – кількісний розрахунок потреби в біспектральних АУР для виконання функцій маскування власних позицій та осліплення противника;

організаційний контур – оцінювання ймовірності організаційного провалу для синхронізації аерозольного маскування із критичним часом оборонного маневру (наприклад, відбиття контратаки, відхід).

Використання розробленої моделі дозволить оптимізувати логістику та раціонально розподіляти дорогі біспектральні засоби на найважливіші ділянки ведення бойових дій, уникаючи перевитрати. Пряме використання критерію оперативності в ході бою гарантує, що застосування аерозольних завіс буде своєчасним і достатнім для захисту маневрених сил від розвідувально-ударних комплексів противника.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Allied Joint Publication (AJP) 3.15. Allied Joint Doctrine for Countering Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Threats. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), February 2018. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/686715/doctrine_nato_countering_ied_ajp_3_15.pdf (last accessed: 20.11.2025).
2. Allied Joint Publication (AJP) 3.20. Allied Joint Doctrine for Force Protection. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), January 2020. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f086ec4d3bf7f2bef137675/doctrine_nato_cyberspace_operations_ajp_3_20_1_.pdf (last accessed: 20.11.2025).
3. STANAG 4107. Mutual Acceptance of Government Quality Assurance and Usage of NATO Quality Assurance Publications. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), November 9, 2018. URL: <https://ru.scribd.com/document/654191405/Aqap-4107-Eng-en-Data> (last accessed: 12.11.2025).
4. PAA Analysis in Severely Restricted Terrain. Kansas : Center for Army Lessons Learned. January 2024. № 24–846. URL: <https://api.army.mil/e2/c/downloads/2024/01/25/a8b49a1b/24-846-paa-analysis-jan-22-public.pdf> (last accessed: 20.11.2025).
5. Мещеряков І. С. Удосконалена методика оцінювання ефективності посилення захисту військ із застосуванням аерозолів // Труді університету. 2023. № 1 (176). С. 50–65.
6. Порівняльний аналіз засобів аерозольного маскування, які знаходяться на озброєнні у Збройних Силах України та армій західних країн-партнерів / І. Танцюра, О. Клімов, О. Стаховський, С. Гузенко // Військово-технічний збірник. 2024. № 30. С. 8–13. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13>

7. Аналіз факторів, що впливають на визначення дальності видимості об'єктів крізь аерозольну завісу / А. В. Писарєв, А. Ф. Лазутський, С. А. Тузіков, С. А. Писарєв // 36. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. 2019. № 3 (61). С. 18–23. URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhaps/issue/archive/2> (дата звернення: 10.11.2025).
8. Аналіз засобів аерозольної протидії Сухопутних військ Збройних Сил України / К. В. Коритченко, І. І. Танцюра, О. П. Клімов, О. В. Стаховський // Механіка та машинобудування. Харків : НТУ “ХПІ”, 2021. № 2. С. 26–30.
9. Розробка напівавтоматичної системи аерозольного маскуванню для не спеціалізованого військового та евакуаційного транспорту / С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов, В. О. Колесник та ін. // Методи та прилади контролю якості. 2024. № 2 (53). С. 94–104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104)
10. Пасічник В. Аерозольне маскуванню: як військові використовують “димові завіси” на фронті. Гвара Медіа. 2025. <https://gwaramedia.com/aerazolne-maskuvannya-yak-vijskovi-vikoristovuyut-dimovi-zavisi-na-fronti/> (дата звернення: 10.11.2025).
11. Маскуванню військ та об'єктів. Захист від високоточної зброї : навч. посіб. / В. В. Пугач, В. П. Чепурний, А. І. Куртов та ін. Харків : БЮІ НІОУ ім. Ярослава Мудрого, 2022. 116 с. https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/maskuvannya_viisk.pdf (дата звернення: 10.11.2025).
12. Порядок використання засобів аерозольного маскуванню // Sprotyv G7. URL: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/poryadok-vikoristannya-zasobiv-aerazolnogo-maskuvannya> (дата звернення: 12.11.2025).
13. Procedure to Optimize the Effectiveness of Man-made Smoke Screens for Fixed Installations : AGARD-CP-542. Neuilly-sur-Seine : NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), May 1993. URL: <https://publications.sto.nato.int/publications/AGARD/AGARD-CP-542/CP-542-25.pdf> (дата звернення: 08.11.2025).
14. STANREC 4567 (AEP-41 VOL 4). Unified Electromagnetic Environmental Effects (UE3) Susceptibility of Platforms, Systems & Equipment to E3. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), 2014. URL: <https://edstar.eda.europa.eu/Standards/Details/7f78e0bc-d49e-4434-9032-1c6697f920ad> (last accessed: 02.11.2025).
15. Kriebel D. P. Screening of New Military Materials for Toxicity and Environmental Harm. CEOBS. 2014. URL: <https://ceobs.org/screening-of-new-military-materials-for-toxicity-and-environmental-harm/> (last accessed: 12.11.2025).
16. Аналіз використання аерозольних (димових) засобів у сучасних бойових діях / С. С. Брянкін, Г. П. Озеран, О. В. Скиба та ін. // 36. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2024. № 4 (22). С. 14–22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02>
17. AArtyP-5. NATO Fire Support Doctrine : STANAG 2484. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), November 2015. URL: <https://www.revista-artilharia.pt/admin/upload/ficheiros/ficheirosMultimedia/aartyp-5-nato-fire-support-doctrine-stanag-2484-ed3-nov15.pdf> (last accessed: 20.11.2025).

18. Command and Staff Organization and Operations : Field Manual FM 6-0. Washington : Department of the Army, May 16, 2022. 224 p. URL: [https://rdl.train.army.mil/catalog-
ws/view/100.ATSC/2DDE6089-23E5-4345-8E9E-7BCD5BDF45C8-1399555122246/fm6_0.pdf](https://rdl.train.army.mil/catalog-
ws/view/100.ATSC/2DDE6089-23E5-4345-8E9E-7BCD5BDF45C8-1399555122246/fm6_0.pdf) (last accessed: 20.11.2025).
19. Pre-release: Methods of Identifying and Evaluation the Camouflage and Deceptive Properties of the Military Equipment in Land Field Trials. Brussels : NATO Science and Technology Organization (STO), July 17, 2025. URL: <https://www.sto.nato.int/document-tag/camouflage/> (last accessed: 20.11.2025).
20. AAP-15. NATO Glossary of Abbreviations Used in NATO Documents and Publications. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), February 27, 2013. URL: https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/Other_Pubs/aap15.pdf (last accessed: 20.11.2025).
21. Smoke Operations : Field Manual FM 3-50. Washington : Department of the Army, September 11, 1996. 104 p. URL: <https://archive.org/details/fm-3-50-smoke-operations-1990/page/n1/mode/2up> (last accessed: 20.11.2025).
22. AEP-97. Multi-Calibre Manual of Proof and Inspection (M-CMOPI) for NATO Small Arms Ammunition. Ed. A, Version 1. Brussels : NATO Standardization Office (NSO), October 8, 2020. URL: <https://diweb.hq.nato.int/naag/Public%20Release%20Documents/AEP-97%20EDA%20V1%20E.pdf> (last accessed: 20.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. *Allied Joint Publication (AJP) 3.15. Allied Joint Doctrine for Countering Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Threats.* (2018, February). NATO Standardization Office. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/686715/doctrine_nato_countering_ied_ajp_3_15.pdf
2. *Allied Joint Publication (AJP) 3.20. Allied joint doctrine for force protection.* (2020, January). NATO Standardization Office. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f086ec4d3bf7f2bef137675/doctrine_nato_cyberspace_operations_ajp_3_20_1_.pdf
3. *STANAG 4107.* (2018, November 9). *Mutual Acceptance of Government Quality Assurance and Usage of NATO Quality Assurance Publications.* NATO Standardization Office. Retrieved from <https://ru.scribd.com/document/654191405/Aqap-4107-Eng-en-Data>
4. *PAA Analysis in Severely Restricted Terrain.* (2024, January). Kansa : Center for Army Lessons Learned. No. 24-846. Retrieved from <https://api.army.mil/e2/c/downloads/2024/01/25/a8b49a1b/24-846-paa-analysis-jan-22-public.pdf>
5. Meshcheriakov, I. S. (2023). Udoskonalena metodyka otsiniuvannia efektyvnosti posylennia zakhystu viisk iz zastosuvanniam aeropoliv [Improved Methodology for Assessing the Effectiveness of Strengthening the Protection of Troops Using Aerosols]. *Trudy universytetu [University Proceedings]*, 1 (176), 50–65. Kyiv [in Ukrainian].
6. Tantsiura, I., Klimov, O., Stakhovskyi, O., & Huzenko, S. (2024). Porivnialnyi analiz zasobiv aeropolnoho maskuvannia, yaki znakhodiatsia na ozbroienni u Zbroinykh Sylakh Ukrainy ta

armii zakhidnykh krain-partneriv [Comparative Analysis of Aerosol Camouflage Means in Service with the Armed Forces of Ukraine and the Armies of Western Partner Countries]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk [Military-Technical Collection]*, 30, 8–13. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13> [in Ukrainian].

7. Pysariev, A. V., Lazutskyi, A. F., Tuzikov, S. A., & Pysariev, S. A. (2019). Analiz faktoriv, shcho vplyvaiut na vyznachennia dalnosti vydymosti ob'ektiv kriz aerzolnu zavisu [Analysis of Factors Affecting the Determination of the Visibility Range of Objects Through an Aerosol Curtain]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Collection of Scientific Works of the Kharkiv National University of the Air Force]*, 3 (61), 18–23. Kharkiv. Retrieved from <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/issue/archive/2> [in Ukrainian].

8. Korytchenko, K. V., Tantsiura, I. I., Klimov, O. P., & Stakhovskyi, O. V. (2021). Analiz zasobiv aerzolnoi protydii Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy [Analysis of Aerosol Countermeasures of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine]. *Mekhanika ta mashynobuduvannia [Mechanics and Mechanical Engineering]*, 2, 26–30. Kharkiv [in Ukrainian].

9. Nekrasov, S. S., Dovhopolov, A. Yu., & Kolesnyk, V. O., et al (2024). Rozrobka napivavtomatychnoi systemy aerzolnoho maskuvannia dlia ne spetsializovanoho viiskovoho ta evakuatsiinoho transportu [Development of a Semi-Automatic Aerosol Masking System for Non-Specialized Military and Evacuation Transport]. *Metody ta Prylady Kontroliu Yakosti [Methods and Devices for Quality Control]*, 2 (53), 94–104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104) [in Ukrainian].

10. Pasichnyk, V. (2025). Aerzolne maskuvannia: yak viiskovi vykorystovuiut “dymovi zavisy” na fronti [Aerosol Camouflage: How the Military Uses “Smoke Screens” on the Front]. *Gvara Media*. Retrieved from <https://gwaramedia.com/aerzolne-maskuvannya-yak-vijskovi-vikoristovuyut-dimovi-zavisi-na-fronti/> [in Ukrainian].

11. Puhach, V. V., Chepurnyi, V. P., & Kurtov, A. I., et al. (2022). *Maskuvannia viisk ta ob'ektiv. Zakhyst vid vysokotochnoi zbroi: navch. posib. [Camouflage of Troops and Objects. Protection Against High-Precision Weapons: training manual]*. Kharkiv. Retrieved from https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/maskuvannia_viisk.pdf [in Ukrainian].

12. Poriadok vykorystannia zasobiv aerzolnoho maskuvannia [Procedure for Using Aerosol Masking Agents]. *Sprotyv G7 [Resistance G7]*. Retrieved from <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/poryadok-vikoristannya-zasobiv-aerzolnogo-maskuvannya> [in Ukrainian].

13. *Procedure to Optimize the Effectiveness of Man-made Smoke Screens for Fixed Installations: AGARD-CP-542*. (May, 1993). Neuilly-sur-Seine: NATO Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD). Retrieved from <https://publications.sto.nato.int/publications/AGARD/AGARD-CP-542/CP-542-25.pdf>

14. *STANREC 4567 (AEP-41 VOL 4). Unified Electromagnetic Environmental Effects (UE3). Susceptibility of Platforms, Systems & Equipment to E3*. (2014). Brussels: NATO Standardization Office (NSO). Retrieved from <https://edstar.eda.europa.eu/Standards/Details/7f78e0bc-d49e-4434-9032-1c6697f920ad>

15. Kriebel, D. P. (2014). *Screening of New Military Materials for Toxicity and Environmental Harm*. CEOBS. Retrieved from <https://ceobs.org/screening-of-new-military-materials-for-toxicity-and-environmental-harm/>
16. Briankin, S. S., Ozeran, H. P., & Skyba, O. V., et al. (2024). Analiz vykorystannia aerosolnykh (dymovykh) zasobiv u suchasnykh boiovykh diiakh [Analysis of the Use of Aerosol (Smoke) Agents in Modern Combat Operations]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky* [Collection of Scientific Works of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment], 4 (22), 14–22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02> [in Ukrainian].
17. AArtyP-5. *NATO Fire Support Doctrine: STANAG 2484*. (November 2015). Brussels : NATO Standardization Office (NSO). Retrieved from <https://www.revista-artilharia.pt/admin/upload/ficheiros/ficheirosMultimedia/aartyp-5-nato-fire-support-doctrine-stanag-2484-ed3-nov15.pdf>
18. *Command and Staff Organization and Operations: Field Manual FM 6-0*. (May 16, 2022). Washington: Department of the Army. Retrieved from https://rdl.train.army.mil/catalog-aws/view/100.ATSC/2DDE6089-23E5-4345-8E9E-7BCD5BDF45C8-1399555122246/fm6_0.pdf
19. *Pre-release: Methods of Identifying and Evaluation the Camouflage and Deceptive Properties of the Military Equipment in Land Field Trials*. (July 17, 2025). Brussels: NATO Science and Technology Organization (STO). Retrieved from <https://www.sto.nato.int/document-tag/camouflage/>
20. AAP-15. *NATO Glossary of Abbreviations Used in NATO Documents and Publications*. (February 27, 2013). Brussels: NATO Standardization Office (NSO). Retrieved from https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/Other_Pubs/aap15.pdf
21. *Smoke Operations: Field Manual FM 3-50*. (September 11, 1996). Washington: Department of the Army. Retrieved from <https://archive.org/details/fm-3-50-smoke-operations-1990/page/n1/mode/2up>
22. AEP-97. *Multi-Calibre Manual of Proof and Inspection (M-CMOPI) for NATO Small Arms Ammunition*. Ed. A, Version 1. (October 8, 2020). Brussels: NATO Standardization Office (NSO). Retrieved from <https://diweb.hq.nato.int/naag/Public%20Release%20Documents/AEP-97%20EDA%20V1%20E.pdf>

I. S. Meshcheriakov, A. A. Nikitin, I. O. Kaplia, A. V. Zalizko, S. P. Buriak

MODEL OF APPLICATION OF AEROSOL CAMOUFLAGE UNITS IN DEFENSE ACCORDING TO NATO STANDARDS

The article considers the current problem of formalizing the processes of using aerosol camouflage units in defense in accordance with NATO standards. The initial guiding documents regulating the use of aerosol means define general principles, however, their practical implementation in combat conditions requires a high degree of coordination of actions during aerosol camouflage. The effective use of aerosol camouflage is a critical element of maintaining the combat capability of units in conditions of modern high-precision weapons and advanced enemy reconnaissance, surveillance and target designation.

The purpose of the study is to develop a model of using aerosol camouflage units in defense

according to NATO standards, which provides scientific substantiation of the processes of planning, management and control over the effectiveness of camouflage measures in combat conditions. It complies with NATO standardization principles, provides for integration into automated troop control systems, and can be used when planning defense actions.

The developed approach allows to formalize the decision-making process regarding the moment of curtain activation, its duration, intensity and optimal distribution of aerosol camouflage means on the terrain. It is important that the model takes into account the multispectral nature of modern enemy reconnaissance means, as well as the requirements for ensuring maneuver concealment and reducing the information availability of defense positions.

The practical result of the research is to obtain an algorithm for controlling aerosol camouflage means, suitable for automation and implementation in modern combat control systems. The proposed model increases the effectiveness of defensive actions due to the ability to predict the density of the aerosol curtain, assess the expected density losses due to changes in weather conditions, and carry out adaptive correction of performance.

Thus, the results of the research create a scientific justification for the processes of planning, management and control over the effectiveness of camouflage measures in combat conditions. It complies with the principles of NATO standardization, provides for integration into automated troop control systems, and can be used when planning defensive actions.

Keywords: *defense; aerosol camouflage; aerosol countermeasures; smoke agents; tactics; model; risk; protection; effectiveness.*

Р. А. Андрощук, Ю. В. Гринюк

АНАЛІЗ СИГНАТУРИ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ПРОЛЬОТУ КРИЛАТИХ РАКЕТ

У сучасних умовах повномасштабної агресії рф та загрози з боку високоточної зброї, зокрема крилатих ракет, питання своєчасного виявлення та ідентифікації повітряних цілей набуває особливої актуальності. Визначення сигнатури акустичного сигналу прольоту крилатих ракет є ключовим елементом у створенні ефективних систем акустичного моніторингу, що дозволяють оперативно реагувати на загрози та забезпечувати захист критичної інфраструктури. Аналіз джерела акустичного шуму під час прольоту крилатої ракети є важливим для виявлення та видачі цілевказівок на її знищення. Джерелами акустичного шуму прольоту крилатої ракети є реактивний двигун, аеродинамічні ефекти, контакт із поверхнею та вибух. Реактивний двигун генерує шум шляхом викиду газів із великою швидкістю, особливо під час старту ракети. Аеродинамічні ефекти, зокрема турбулентні потоки та ударні хвилі, також призводять до аеродинамічного шуму. Контакт із поверхнею та вибух під час зіткнення із цілями створюють додаткові шумові сигнали. Аналіз цих джерел шуму допомагає вдосконалювати системи виявлення та ідентифікації прольоту крилатих ракет. У статті наведено приклади зареєстрованих акустичних сигналів від прольоту крилатих ракет, визначено особливості побудови хвильової форми акустичного сигналу, його амплітудних, часових та спектральних параметрів, які дозволяють його ідентифікувати. Аналіз даних зареєстрованих сигналів показує характерні особливості хвильової форми та параметрів акустичних сигналів від прольоту крилатих ракет: тривалість акустичного сигналу, що реєструється, становить від 2–3 с до 12–15 с; акустичний сигнал реактивного (турбореактивного) двигуна має спектральний портрет із шумоподібною структурою, що займає смугу частот від десятків герц до 2,5–3 кГц та обмежується частотою у 8 кГц; максимум енергії сигналу зосереджено в області частот від 0,12 кГц до 0,6 кГц, найчастіше – на частотах близько 300 Гц; ширина спектра становить близько 1–2 кГц. Визначена сигнатура акустичного сигналу прольоту крилатих ракет може бути інтегрована в системи акустичного моніторингу для забезпечення комплексного спостереження (виявлення) та аналізу повітряних загроз.

Ключові слова: крилата ракета; акустичний сигнал; сигнатура; спектрограма; система акустичного моніторингу; виявлення та ідентифікація прольоту крилатої ракети.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Упродовж повномасштабної війни проти України рф активно використовує для знищення інфраструктури різні види ракетного озброєння в поєднанні з ударними безпілотними апаратами (БпЛА) типу Shahed. Аналіз повідомлень Генерального штабу Збройних Сил України, інших офіційних

джерел, а також аналітичних звітів [1–4] показує, що у війні проти нашої держави РФ активно застосовувала близько десяти типів ракет, із них чотири – це балістичні ракети: «Іскандер-М»; «Точка-У»; Х-47М2 «Кинджал» повітряного базування та корейська KN-23 (офіційна назва – Hwasong-11Ga); решта – крилаті ракети (КР): «Калібр» морського базування; «Онікс» морського і берегового базування; «Іскандер-К» наземного базування; Х-101 та Х-555 (модифікація радянської Х-55) повітряного базування; Х-22 та Х22М/МА (радянська надзвукова крилата протикорабельна ракета повітряного базування), 3М22 «Циркон» (гіперзвукова протикорабельна КР). У таких умовах важливим елементом організації протидії ракетним обстрілам [5, 6] є вдосконалення систем виявлення та визначення траєкторії польоту повітряних цілей за балістичною траєкторією та на малих висотах. Однією зі складових такої системи є акустична, яка показала високу ефективність для виявлення КР та БпЛА типу Shahed. Система акустичного моніторингу (САМ) побудована за мережевою технологією на основі територіально рознесених акустичних датчиків (АД), що дозволяють відслідковувати повітряні цілі в місцях, де немає радіолокаційного покриття. У зв'язку із цим питання дослідження та врахування особливостей акустичних сигналів прольоту КР та БпЛА типу Shahed для вдосконалення алгоритмів і методів оброблення в системі виявлення та визначення траєкторії польоту повітряних цілей на малих висотах (ПЦМВ) є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років велика кількість робіт як вітчизняних [7–9], так і закордонних дослідників [10–12] була присвячена вивченню характеристик акустичного випромінювання ПЦМВ. Так, у публікаціях [7–9] проаналізовано деякі особливості акустичних сигналів БпЛА, КР, реактивних та турбогвинтових літаків, гелікоптерів. У роботах закордонних дослідників [10–12] основну увагу зосереджено на зменшенні акустичних шумів, що породжує турбореактивний двигун літака. Визначено основні джерела шуму турбореактивного двигуна літака, що можуть бути віднесені й до джерел шумів турбореактивного двигуна КР. Проте питання аналізу сигнатур акустичних сигналів прольоту КР розкрито не в повній мірі.

Формулювання завдання дослідження. Метою дослідження є визначення сигнатур акустичних сигналів прольоту КР шляхом аналізу їх у часовій та спектральній областях для подальшого вдосконалення методів і алгоритмів їх виявлення та обробки в САМ.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження сигнатур акустичних сигналів від прольоту КР проведено обробку їх аудіосигналу, який записаний на мікрофон (або АД). Тому важливим є проаналізувати умови дослідження, а саме основні характеристики мікрофона [13]: чутливість, акустичну та амплітудно-частотну характеристики (АЧХ), частотний діапазон. Відомо, що чутливість мікрофона визначається відношенням напруги на виході мікрофона до звукового тиску у вільному звуковому полі, тобто за відсутності сигналу. Чутливість сучасних мікрофонів становить від 1–2 мВ/Па (для динамічних) до 10–15 мВ/Па (для конденсаторних). Акустична характеристика визначає направленість мікрофона. За видом акустичної характеристики, а отже, і направленістю відрізняють три типи мікрофонів як приймачів звуку: приймачі тиску; градієнти тиску; комбіновані. АЧХ – це залежність чутливості мікрофона від частоти звукових коливань. Типові АЧХ мікрофонів [13] наведено на рис. 1.

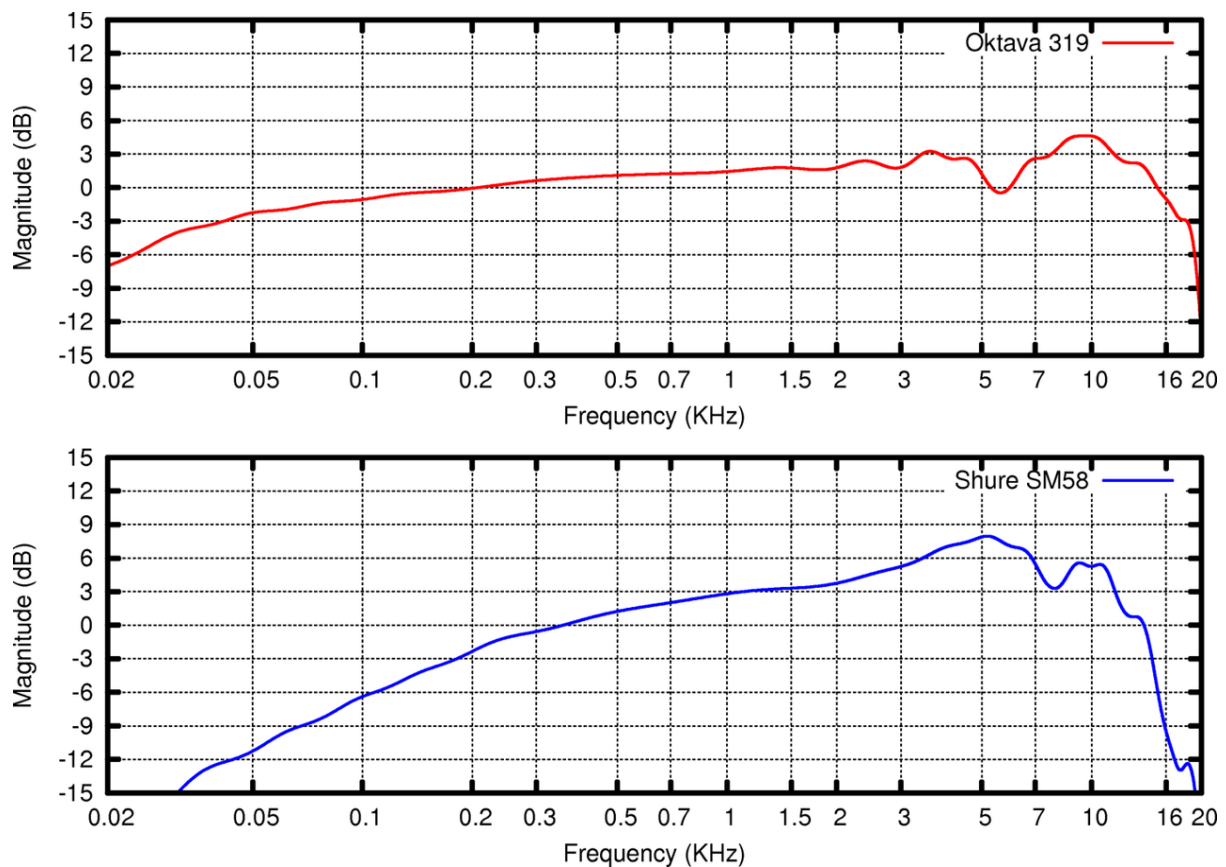


Рис. 1. Приклади АЧХ мікрофонів

Як видно з рис. 1, АЧХ пов'язана із залежністю чутливості мікрофона від частоти звукових коливань. Нерівномірність АЧХ вимірюють у децибелах як відношення чутливості мікрофона на певній частоті до чутливості на середній частоті, наприклад, 1000 Гц. Відомо, що частотний діапазон сучасних зразків мікрофонів лежить у межах від 50 Гц до 16 кГц.

Аналіз наведених характеристик мікрофонів показує, що сигнали від прольоту КР можуть бути зареєстровані в частотному діапазоні 50 Гц – 16 кГц. При цьому найбільш сприятливою для спостережень акустичних сигналів є ділянка від 300 Гц до 14 кГц.

Створений КР акустичний сигнал є досить складним. Джерела акустичного шуму КР оснащених турбореактивними двигунами, можна розділити на такі складові [10]:

- 1) шум, створений лопатями вентилятора, компресорів і турбіни (Fan Ton Noise та Fan Broadband Noise);
- 2) шум камери згоряння (Combustor Noise), пов'язаний зі швидким окисненням ракетного палива;
- 3) шум, породжений змішуванням високошвидкісних вихлопних газів із навколишнім повітрям (Jet Noise);
- 4) аеродинамічний шум.

Орієнтовний спектр акустичного шуму турбореактивного двигуна (Total Engine Noise) та його складові [10] наведено на рис. 2.

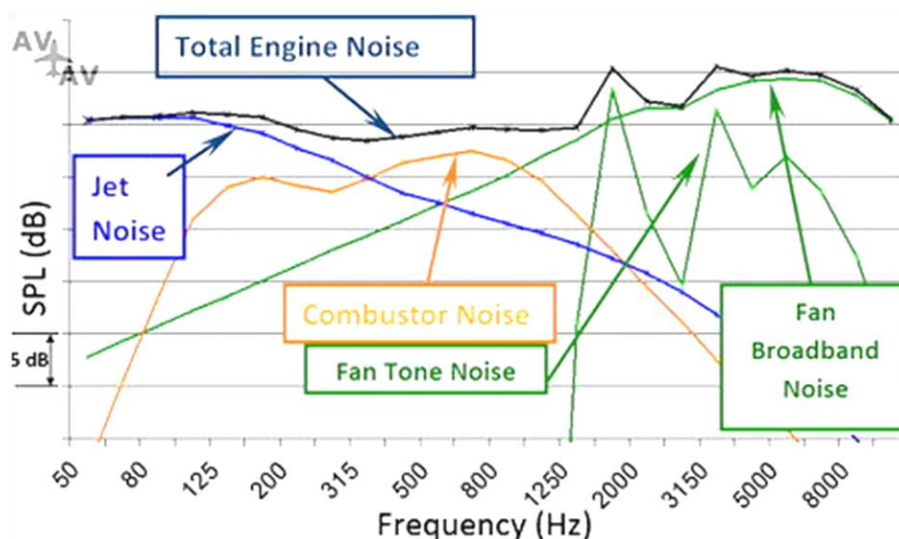


Рис. 2. Спектр акустичного шуму турбореактивного двигуна

Аналіз даних, наведених на рис. 2, показує, що:

шуми, створені лопатями вентилятора, компресорів і турбіни (Fan Ton Noise та Fan Broadband Noise), розподілені в межах вузької смуги від 1,3 кГц до 8 кГц та мають піки спектра на 2 кГц та 5 кГц;

шум камери згоряння (Combustor Noise) має більш низькочастотну (НЧ) вузькосмугову складову від 80 Гц до 2 кГц;

шум, породжений змішуванням високошвидкісних вихлопних газів із навколишнім повітрям (Jet Noise), має НЧ складову в межах від 50 Гц до 2 кГц.

Отже, найбільшим джерелом акустичного шуму КР є її двигун. Більшість його шумів зумовлена шумом вихлопних газів. Високошвидкісний струмінь газів, залишаючи задню частину двигуна, є нестійким і створює турбулентність, що є потужним джерелом широкосмугового звукового випромінювання.

Під сигнатурою акустичного сигналу у статті розуміємо особливості побудови його хвильової форми, а також амплітудних, часових та спектральних параметрів, які дозволяють ідентифікувати зареєстрований акустичний сигнал як прольот КР. За досвідом оброблення акустичних сигналів від штучних джерел збурень у Житомирському військовому інституті імені С. П. Корольова та Головному центрі спеціального контролю Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, основними параметрами сигналу, що дозволяють розкрити його сигнатуру, визначено:

тривалість сигналу – τ ;

час наростання максимальної амплітуди – t_n ;

частоту сигналу на ділянках вступу $f_{вст}$, основної $f_{осн}$ та хвостової $f_{хв}$ частин;

ширину спектра сигналу Δf та частотний інтервал, що відповідає цій ділянці, $(f_n \dots f_e)$;

частоти, що відповідають максимальній потужності сигналу $F(P_{max})$;

частоту, якою обмежено спектр сигналу, $F_{обм}$.

Проаналізуємо основні параметри зареєстрованих акустичних сигналів від прольоту КР, винищувачів на низькій висоті та гелікоптерів. За структурою в отриманих

акустичних сигналах можна виділити вступну, основну та хвостову частини. Приклад зареєстрованого сигналу від прольоту КР у часовій області наведено на рис. 3.

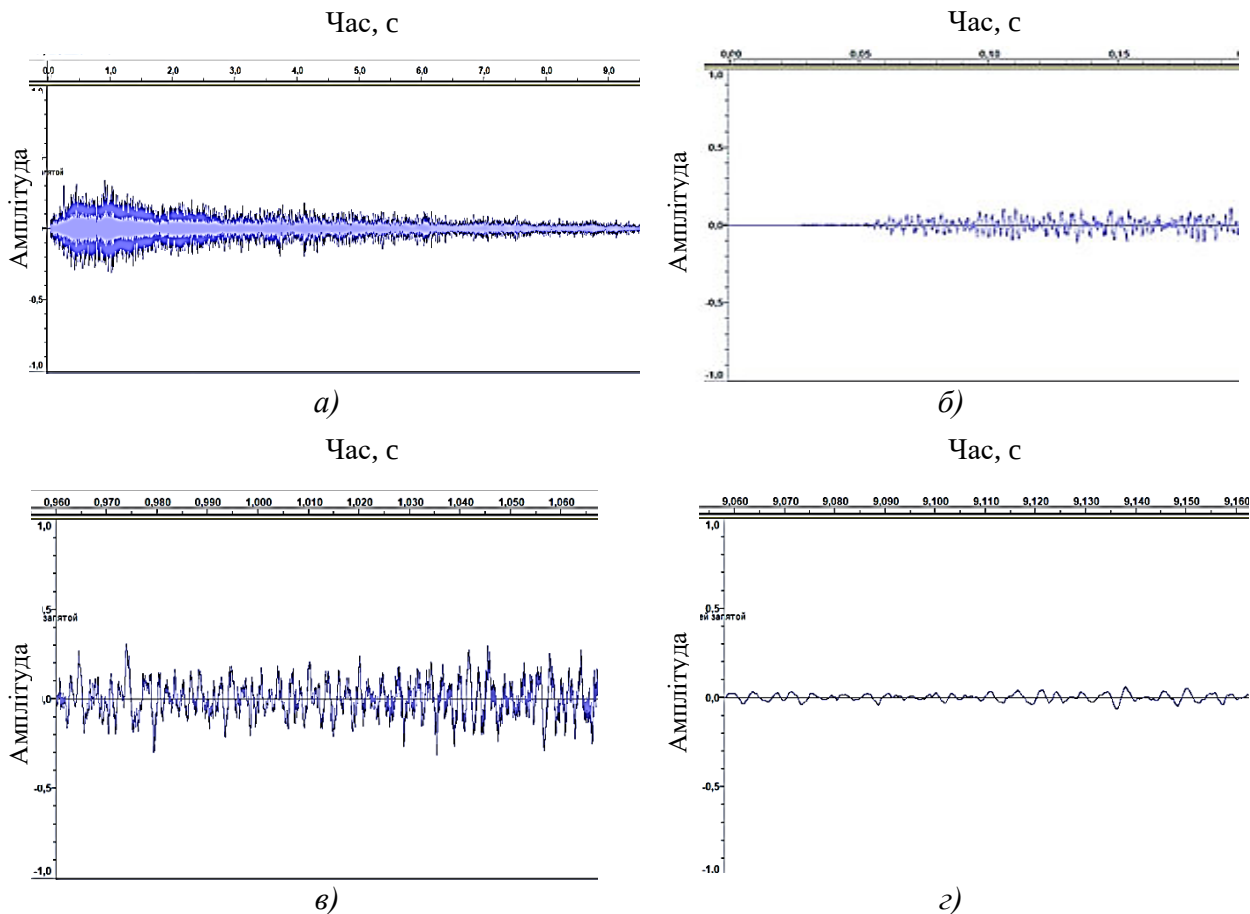


Рис. 3. Приклад зареєстрованого акустичного сигналу № 1 від прольоту КР

На рис. 3а проілюстровано загальний вигляд акустичного сигналу від прольоту КР у часовій області, а на наступних рис. 3б–3г – більш детально його окремі ділянки.

Так, на рис. 3б показано ділянку, що відповідає вступу сигналу в часовій області. Як бачимо, вона являє собою зростаючі за амплітудою коливання квазисинусоїдальної форми з періодом $T = 0,0024$ с ($f = 416,7$ Гц).

На рис. 3в зображено ділянку, на яку припадає максимальна амплітуда сигналу (за 1,06 с від початку його вступу). Вона містить коливання квазисинусоїдальної форми з періодом $T = 0,0015$ с ($f = 666,667$ Гц).

Хвостову частину сигналу наведено на рис. 3г, на якому спостерігаємо поступово згасаючі за амплітудою коливання квазисинусоїдальної форми з періодом $T = 0,004875$ с ($f = 205,128$ Гц).

Спектрограму та спектр зареєстрованого акустичного сигналу від прольоту КР наведено на рис. 4 та рис. 5, аналіз яких показує, що отриманий результат відповідає типовій спектрограмі акустичного сигналу турбореактивного двигуна, отриманий у [10]. Смуга частот, яку займає акустичний сигнал, та насиченість спектра гармоніками змінюється під час переміщення КР відносно АД.

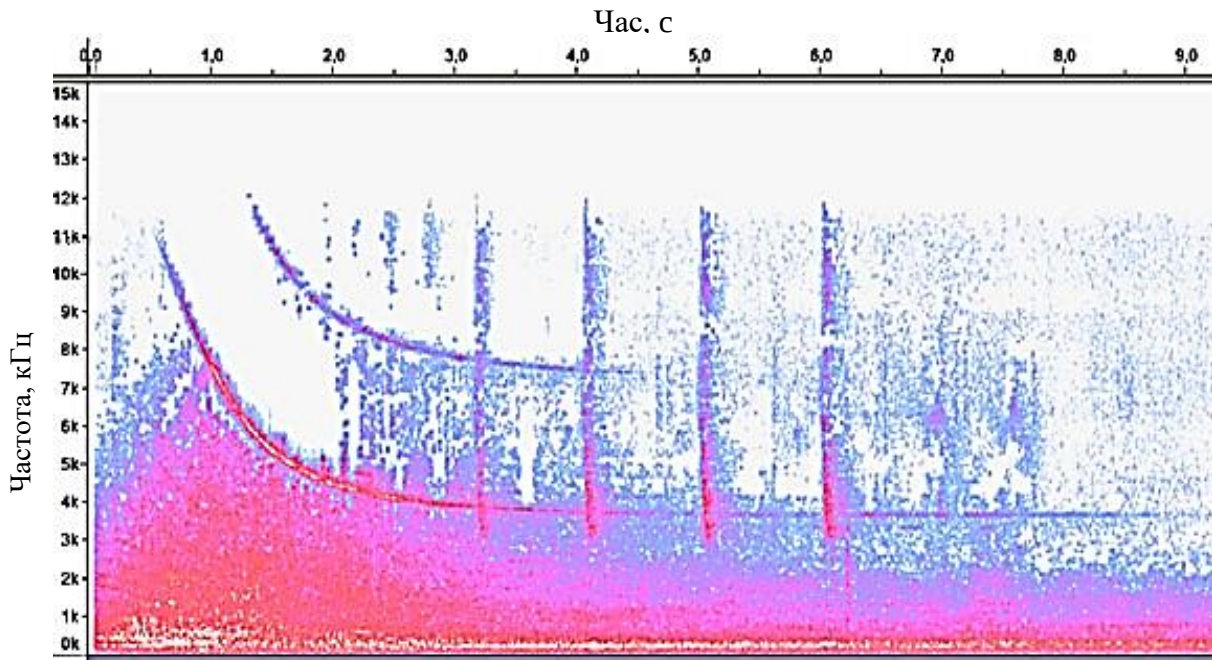


Рис. 4. Спектрограма зареєстрованого акустичного сигналу № 1 від прольоту КР

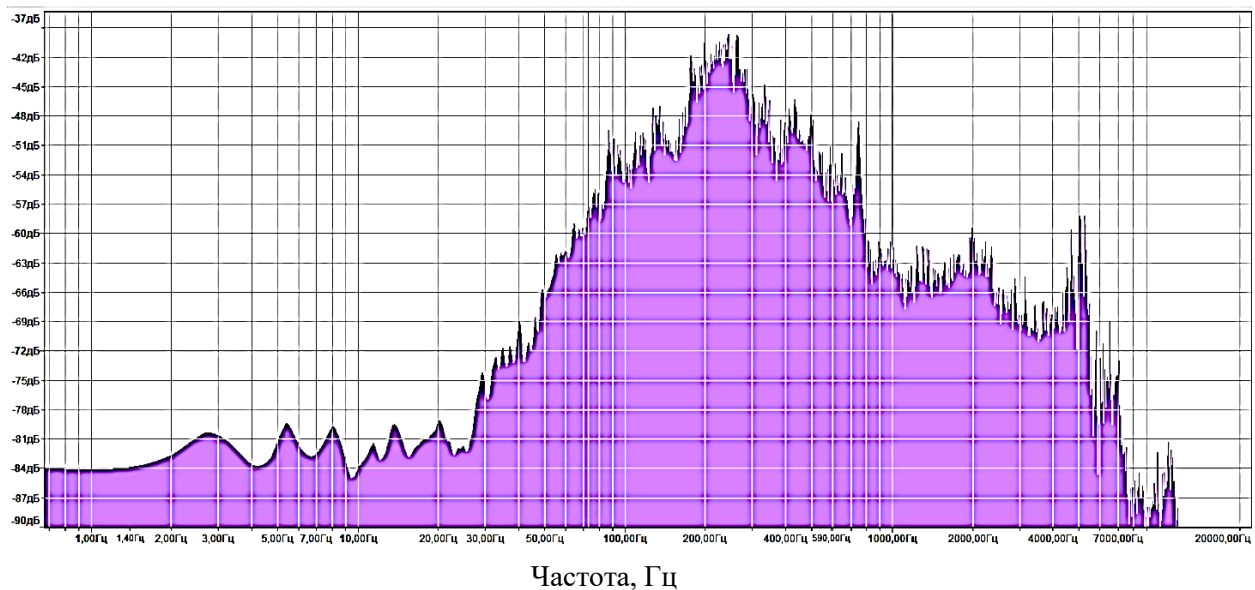


Рис. 5. Спектр зареєстрованого акустичного сигналу № 1 від прольоту КР

Із теорії поширення акустичних сигналів звукового діапазону відомо [14], що амплітуда та частота сигналів у разі збільшення відстані до джерела буде зменшуватися. При цьому амплітуди акустичних сигналів високої частоти (ВЧ) в ході розповсюдження поглинаються середовищем більше, ніж сигналів НЧ. Під час наближення до АД ширина спектра акустичного сигналу і кількість гармонічних складових збільшуються та є найбільшими за їх максимального зближення. У разі віддалення спостерігається зворотний ефект, причому звуження спектра відбувається за рахунок зниження максимальної частоти, що пояснюється більшим затуханням високочастотних складових в атмосфері [14].

Результати вимірювання основних параметрів зареєстрованих сигналів від прольоту КР (сигнали № 1–9), турбореактивного літака (сигнали № 10–12) та гелікоптера (сигнали № 13–15) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри зареєстрованих акустичних сигналів

Сигнал №	Параметри сигналу							
	τ , с	t_n , с	$f_{вст}$, Гц	$f_{осн}$, Гц	$f_{хв}$, Гц	Δf , Гц; ($f_n \dots f_6$), Гц	$F(P_{max})$, Гц	$F_{обм}$, Гц
1	11	0,9	416,7	666,7	205,1	860; (40...900)	250	8000
2	5,3	-	-	416,7	217,4	1372; (28...1400)	70; 200; 500	6800
3	3,2	1,1	333,3	347,8; 7619,1	347,8	1745; (55...1800)	125; 500	10000
4	5	1,7	258,1	427,4	353,4	1460; (40...1500)	55; 150; 450	8000
5	7,6	2,1	460,8	277,8	214,1	966; (34...1000)	100; 250	6500
6	4,0	0,7	348,4	380,2	185,1	1550; (50...1600)	400	6000
7	7,5	2,7	666,7	281,7	228,3	940; (160...1100)	250	8000
8	5,9	2,9	363,6	461,5	428,6	974; (26...1000)	70	8000
9	7,0	1,04	555,6	1470	142,8	1945; (55...2000)	150; 500	7000
10	24	12	2069,0	3809,5	2272,7	4000; (0...4000)	400...500	20000
11	21	15	857,14	181,8; 2955,7	142,9	2180; (20...2200)	100...200	10000
12	17,2	8,1	-	-	-	1970; (30...2000)	300; 500...600	7000
13	55	2,0	1162,8	1190,5	416,7	1382; (30...2000)	20...25; 35...50	9000
14	60	24	340	190,5	315,8	795; (55...850)	250	3000
15	62	40	-	-	-	1140; (60...2200)	120; 180	15000

Аналіз даних, наведених у табл. 1, показує такі характерні особливості хвильової форми та параметрів акустичних сигналів від прольоту КР (сигнали № 1–9):

вступ сигналу починається з різкого наростання його амплітуди до максимальної за час 0,7–2,9 с, на відміну від запису прольоту літаків 8–15 с (сигнали № 10–12) та гелікоптерів 24–40 с (сигнали № 14–15);

ділянка наростання амплітуди сигналу до максимальної відповідає наближенню КР до АД; подальша ділянка поступового зменшення амплітуди сигналу становить близько 70–85% тривалості сигналу і відповідає віддаленню КР від спостерігача;

тривалість акустичного сигналу від прольоту КР коливається в межах 6–11 с (сигнали № 1–9), на відміну від запису прольоту літаків 20–24 с (сигнали № 10–12) та гелікоптерів 55–62 с (сигнали № 13–15);

частота коливань вступної частини акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 258–666 Гц ;

частота коливань основної частини акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 277–666 Гц, на одному із сигналів виділено ще й високочастотну складову коливань 7619 Гц (сигнал № 3);

частота коливань хвостової частини акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 142–428 Гц;

ширина частотного спектра за рівнем 0,7 потужності акустичних сигналів від прольоту КР коливається в межах 760–1945 Гц і займає частотний діапазон 26 Гц – 2000 Гц;

акустичні сигнали від прольоту КР мають виражені піки спектра на частотах від 70 Гц до 500 Гц;

частотний спектр акустичного сигналу від прольоту КР обмежений частотою 7–8 кГц.

Усі зареєстровані акустичні сигнали відповідають випадкам прольоту КР над АД або в безпосередній близькості до нього. На рис. 6 наведено спектрограми інших записів акустичних сигналів КР [8] під час прольоту над АД. Специфічне розміщення вузькосмугових складових на частотно-часовій площині може стати характерною ознакою для виявлення та розпізнавання типу КР.

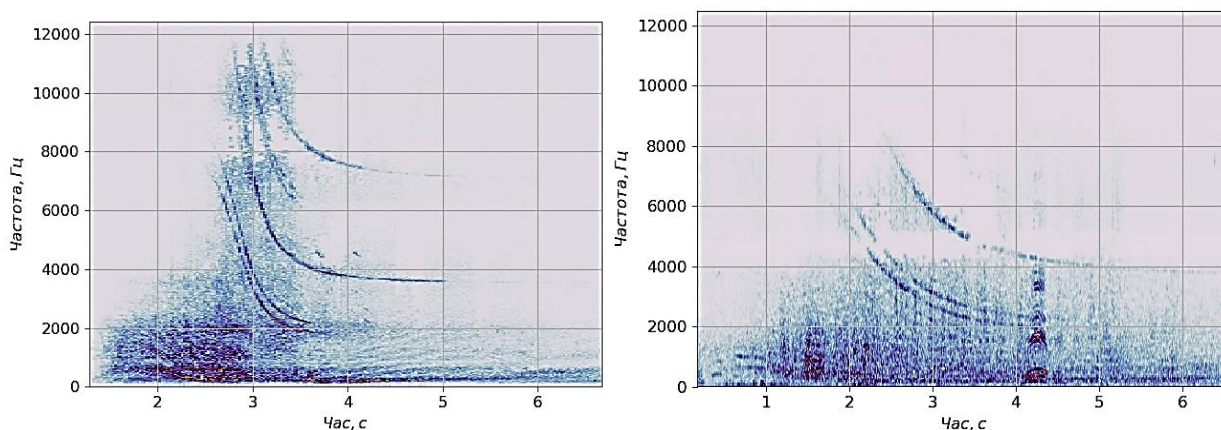


Рис. 6. Спектрограма акустичного сигналу КР під час прольоту над АД

На рис. 7 показано типову хвильову форму акустичного сигналу КР під час прольоту над АД, що відображає залежність рівня акустичного шуму на часовій осі. Як бачимо, амплітуда сигналу наростає швидше, ніж спадає. Причому в його передній частині, як впливає зі спектрограми (рис. 6), зосереджено в основному НЧ складові. У середній частині сигналу, що відповідає максимальному зближенню КР і АД, найбільше проявляються вузькосмугові складові. У хвостовій – спостерігається зменшення амплітуд як НЧ широкосмугових складових, так і вузькосмугових.

Виходячи з проведеного аналізу, характерними відмінними ознаками акустичних сигналів прольоту КР є:

- 1) невелика тривалість сигналу, що реєструється;
- 2) його шумоподібна структура з кількома частотно-модульованими складовими;
- 3) імпульсна форма обвідної сигналу зі згладженими краями;

- 4) розмах і швидкість зміни частоти Доплера;
- 5) швидкість зміни ширини спектра сигналу;
- 6) швидкість зміни потужності сигналу.

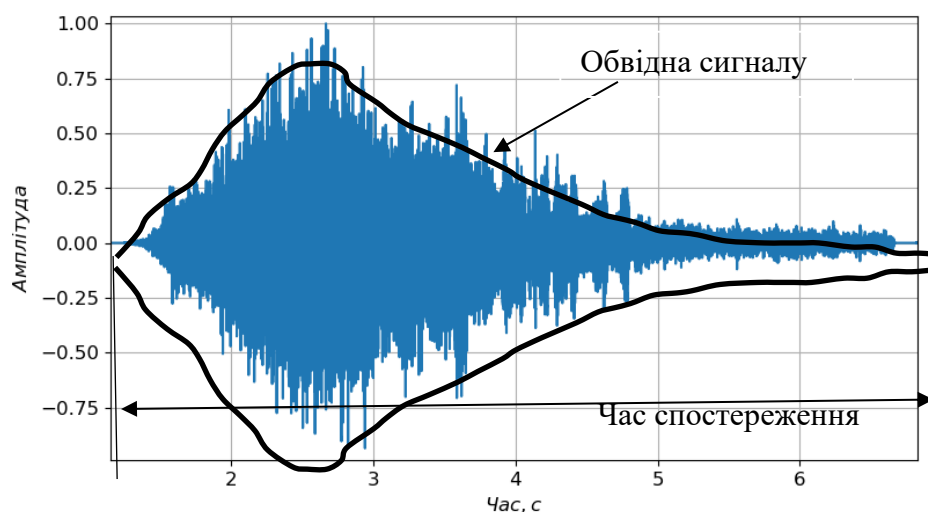


Рис. 7. Запис типового акустичного сигналу прольоту КР біля АД

Через велику швидкість руху КР (порівняно з більшістю інших джерел акустичних сигналів, які можуть переміщуватися біля АД) наведені вище швидкості зміни параметрів також будуть високими. Використовуючи цю ознаку, можна забезпечити надійну ідентифікацію акустичних сигналів прольоту КР.

Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в підсумку результаті проведених досліджень удосконалено опис сигнатури акустичних сигналів прольоту КР та визначено характерні особливості для їх ідентифікації на фоні інших джерел акустичних сигналів (літаків, гелікоптерів). Тривалість акустичного сигналу прольоту КР може становити від 2–3 с до 12–15 с, вона визначається швидкістю її польоту, відстанню до АД, станом середовища поширення. Акустичний сигнал КР (реактивного, турбореактивного двигуна) має спектральний портрет із шумоподібною структурою, що займає смугу частот від десятків герц до 2,5–3 кГц та обмежується частотою у 8 кГц. Максимум енергії сигналу зосереджено в області частот від 0,12 кГц до 0,6 кГц, найчастіше – на частотах близько 300 Гц. Ширина спектра становить близько 1–2 кГц, вона залежить від дальності прольоту КР від АД: чим більшою є ця відстань, тим спектр буде вужчим через затухання в атмосфері високочастотних складових. В акустичному сигналі прольоту КР гармонічні складові, зумовлені обертанням лопатей турбіни двигуна, виражені слабо. Отримані авторами результати щодо визначеної сигнатури акустичних сигналів прольоту КР апробовані на наукових конференціях [15, 16] та можуть бути використані для покращення ідентифікації прольоту КР у системах акустичного моніторингу.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Крилаті ракети рф: які є, скільки та що із цим робити. URL: <https://mind.ua/publications/20271058-krilati-raketi-rf-yaki-e-skilki-ta-shcho-iz-cim-robiti> (дата звернення: 01.09.2025).

2. Категорія: Крилаті ракети р осії. URL: <https://bit.ly/4ojTSAU> (дата звернення: 01.09.2025).
3. Російські крилаті ракети: виробники, номенклатура і можливості. URL: <https://military.com/uk/articles/rosijski-krylati-rakety-vyrobnyky-nomenklatura-i-mozhlyvosti/> (дата звернення: 01.09.2025).
4. Defeating Cruise Missiles. Technical Report APA-TR-2007-0402. URL: <http://www.ousairpower.net/Analysis-Cruise-Missiles.html> (last accessed: 10.09.2025).
5. Tate D. C. Acoustic Littoral Engagement Response to Threats – ALERT A System to Provide Advanced Warning of an Anti-Ship Missile Attack. RTO-MP-SET-079. 2004. 12 p.
6. Stillton J., Orletsky D. T. Airbase Vulnerability to Conventional Cruise-Missile and Ballistic-Missile Attacks: Technology, Scenarios, and U.S. Air Force Responses. RAND, 1999. 120 p.
7. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення безпілотник літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів // Вісник ЖДТУ. 2014. № 4 (71). С. 71–80.
8. Розроблення сигнатури аудіосигналу прольоту крилатої ракети для системи акустичного моніторингу: звіт про виконання оперативного завдання / Наук. кер-к І. М. Сашук, відп. вик. Р. А. Андрощук, вик. О. І. Ляшук, І. О. Солопій, О. М. Терещенко, В. С. Кокра. Житомир : ЖВІ, 2022. 61 с.
9. 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 (І). С. 58–75. <http://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06>
10. Ann P. Dowling, Yasser Mahmoudi. Combustion noise // Science Direct Proceedings of the Combustion Institute. 2015. Vol. 35. P. 65–100. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.08.016>
11. Krebs W., Bütikofer R., Plüss S., Thomann G. Spectral Three-Dimensional Sound Directivity Models for Fixed Wing Aircraft // Acta Acustica Acustica. 2006. Vol. 92. P. 269–277.
12. Bütikofer R., Thomann G. Aircraft Sound Measurements: The Influence of Microphone Height // Acta Acustica. 2005. Vol. 91. P. 907–914.
13. АЧХ мікрофона. URL: <http://jablog.ru/blog/studio-1/3845.html> (дата звернення: 05.10.2025).
14. Артилерійська звукова розвідка : Підруч. / О. Красюк, Р. Сергієнко, С. Соколовський та ін. Львів : НАСВ, 2020. 346 с.
15. Андрощук Р. А., Кокра В. С. Побудова системи акустичних спостережень для виявлення прольоту крилатої ракети // Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони : зб. тез доп. VI Міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 23.05.2023). Київ : НУО України, 2023. С. 47.
16. Андрощук Р. А., Кокра В. С. Використання технології пасивного моніторингу для виявлення та спостережень прольоту крилатих ракет // Тези доп. III наук.-техн. конф. ДНДІ ВС ОБТ (“Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки”), (м. Черкаси, 26.09.2024). Черкаси : Вид-вець Євенок О. О., 2024. С. 216–218.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2025.

REFERENCES

1. *Krylati rakety rf: yaki ye, skilky ta shcho iz tsym robyty [Cruise Missiles of the russian federation: what are they, how many and what to do with them]*. (n.d.). Retrieved from

<https://mind.ua/publications/20271058-krilati-raketi-rf-yaki-e-skillki-ta-shcho-iz-cim-robiti> [in Ukrainian].

2. *Katehoriia: Krylati rakety rosii* [Category: Cruise Missiles of Russia]. (n.d.). Retrieved from <https://bit.ly/4ojTSAU> [in Ukrainian].

3. *Rosiiski krylati rakety: vyrobnyky, nomenklatura i mozhlyvosti* [Russian Cruise Missiles: Manufacturers, Nomenclature and Capabilities]. (n.d.). Retrieved from <https://military.com/uk/articles/rosijski-krylati-rakety-vyrobnyky-nomenklatura-i-mozhlyvosti/> [in Ukrainian].

4. *Defeating Cruise Missiles. Technical Report APA-TR-2007-0402*. (n.d.). Retrieved from <http://www.ausairpower.net/Analysis-Cruise-Missiles.html>

5. Tate, D. C. (2004). *Acoustic Littoral Engagement Response to Threats – ALERT A System to Provide Advanced Warning of an Anti-Ship Missile Attack*. RTO-MP-SET-079.

6. Stillton, J., & Orletsky, D. T. (1999). *Airbase Vulnerability to Conventional Cruise-Missile and Ballistic-Missile Attacks: Technology, Scenarios, and U.S. Air Force Responses*. RAND.

7. Danyk, Yu. H., Puleko, I. V., Buhaiov, M. V. (2014). *Vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi analizu akustychnykh ta radiolokatsiinykh syhnaliv* [Detection of Unmanned Aerial Vehicles Based on the Analysis of Acoustic and Radar Signals]. *Visnyk ZhDTU [Bulletin of ZhSTU]*, 4 (71), 71–80 [in Ukrainian].

8. Sashchuk, I. M., Androshchuk, R. A., & Liashchuk, O. I., et al. (2022). *Rozroblennia syhnatury audiosyhnalu prolodu krylatoi rakety dlia systemy akustychnoho monitorynhu : zvit pro vykonannia operatyvnogo zavdannia* [Development of the Signature of the Audio Signal of the Flight of a Cruise Missile for the Acoustic Monitoring System: Report on the Implementation of the Operational Task]. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

9. Pozdniakov, V. V., & Buhaiov, M. V. (2023). *Analiz akustychnykh syhnaliv zasobiv povitrianoho napadu* [Acoustic Signals Analysis of Aerial Attack Weapon]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats* [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute], 25 (I), 58–75. <http://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25.06> [in Ukrainian].

10. Ann, P. Dowling, Yasser Mahmoudi. (2015). Combustion noise. *Science Direct Proceedings of the Combustion Institute*, 35, 65–100. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.08.016>

11. Krebs, W., Bütikofer, R., Plüss, S., & Thomann, G. (2006). Spectral Three-Dimensional Sound Directivity Models for Fixed Wing Aircraft. *Acta Acustica Acustica*, 92, 269–277.

12. Bütikofer, R., & Thomann, G. (2005). Aircraft Sound Measurements: The Influence of Microphone Height. *Acta Acustica*, 91, 907–914.

13. *AChKh mikrofonta* [Microphone Amplitude-Frequency Response]. (n.d.). Retrieved from <http://jablog.ru/blog/studio-1/3845.html> [in Ukrainian].

14. Krasiuk, O., Serhiienko, R., & Sokolovskyi, S., et al. (2020). *Artyleriiska zvukova rozvidka: Pidruch.* [Artillery Sound Reconnaissance: Tutorial]. Lviv [in Ukrainian].

15. Androshchuk, R. A., & Kokra, V. S. (2023). *Pobudova systemy akustychnykh sposterezhen dlia vyivlennia prolodu krylatoi rakety* [Construction of an Acoustic Observation System for Detecting the Flight of a Cruise Missile]. In *Zastosuvannia kosmichnykh ta heoinformatsiinykh system v interesakh natsionalnoi bezpeky ta oborony : zb. tez dop. VI Mizhn. nauk.-prakt. konf.*

[Application of Space and Geoinformation Systems in the Interests of National Security and Defense: Collection of Abstracts of the VI International Scientific and Practical Conference]. Kyiv, 23.05.2023. (P. 47) [in Ukrainian].

16. Androshchuk, R. A., Kokra, V. S. (2024). Vykorystannia tekhnolohii pasyvnoho monitorynhu dlia vyjavlennia ta sposterezhen prolotu krylatykh raket [Using Passive Monitoring Technology to Detect and Observe the Flight of Cruise Missiles]. *Tezy dop. III nauk.-tekhn. konf. DNDI VS OVT ("Vyprobuvannia i sertyfikatsiia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki")* [Abstracts of the 3rd Scientific and Technical Conference of the National Research Institute of Armed Forces of Ukraine ("Testing and Certification of Weapons and Military Equipment")]. Cherkasy, 26.09.2024. (pp. 216–218) [in Ukrainian].

R. A. Androshchuk, Yu. V. Hryniuk

SIGNATURE ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNAL OF CRUISE MISSILES

In the current conditions of full-scale aggression by the Russian Federation and the threat from high-precision weapons, in particular cruise missiles, the issue of timely detection and identification of air targets is becoming particularly urgent. Determining the signature of the acoustic signal of cruise missiles is a key element in creating effective acoustic monitoring systems that allow for a prompt response to threats and ensure the protection of critical infrastructure. Analysis of the source of acoustic noise during the flight of a cruise missile is important for detecting and issuing target designations for its destruction. The sources of acoustic noise during the flight of a cruise missile are the jet engine, aerodynamic effects, contact with the surface and explosion. The jet engine generates noise by releasing gases at high speed, especially during the launch of the missile. Aerodynamic effects, in particular turbulent flows and shock waves, also lead to aerodynamic noise. Surface contact and explosion during collision with targets create additional noise signals. Analysis of these noise sources helps to improve systems for detecting and identifying cruise missiles. The article provides examples of recorded acoustic signals from the flight of cruise missiles, identifies the features of constructing the waveform of the acoustic signal, its amplitude, time and spectral parameters, which allow its identification. Analysis of the data of the recorded signals shows the characteristic features of the waveform and parameters of acoustic signals from the flight of cruise missiles: the duration of the recorded acoustic signal is from 2–3 s to 12–15 s; the acoustic signal of a jet (turbojet) engine has a spectral portrait with a noise-like structure, occupying a frequency band from tens of hertz to 2,5–3 kHz and is limited to a frequency of 8 kHz; the maximum signal energy is concentrated in the frequency range from 0,12 kHz to 0,6 kHz, most often at frequencies of about 300 Hz; the spectrum width is about 1–2 kHz. The determined signature of the acoustic signal of the flight of cruise missiles can be integrated into acoustic monitoring systems to provide comprehensive surveillance (detection) and analysis of air threats.

Keywords: *cruise missile; acoustic signal; signature; spectrogram; acoustic monitoring systems; detection and identification of the flight of cruise missiles.*

І. А. Омельчук, А. М. Токар, В. Л. Рикун, І. В. Свистунович

ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ

Тривала збройна агресія проти України та світовий досвід використання безпілотних систем у збройних конфліктах протягом останніх років став поштовхом до створення окремого роду сил у структурі Збройних Сил України.

На сьогодні спостерігається стійка тенденція до зростання ролі безпілотних систем у складі озброєння, що зумовлює потребу в нарощуванні обсягів розроблення, створення та виробництва сучасних безпілотних комплексів різного напрямку застосування. Складність процесів, що покладені в основу функціонування безпілотних систем, численні елементи й системи, взаємопов'язані між собою, велика кількість різноманітних параметрів та характеристик зразків безпілотних систем – усе це обумовлює необхідність їх дослідження й підтвердження правильності прийнятих нових технічних рішень, а також втілення вже наявних у ході розроблення та виробництва безпілотних систем. Аналіз і нормування їх тактико-технічних характеристик є актуальним завданням для забезпечення точного планування бойових дій. Для цього розроблені зразки озброєння мають пройти випробування та дослідження характеристик. Випробування є основним способом підтвердження відповідності наявних характеристик заявленим тактико-технічним вимогам до зразків техніки. Методи випробувань повинні передбачати застосування стандартизованих алгоритмів і процедур. Оскільки джерелом інформації, на основі якої можна зробити висновок про відповідність сировини чи продукту, є результати випробувань, то впевненість у їх достовірності може забезпечити підтвердження надійності застосовуваного методу.

У наш час таким способом підтвердження відповідності отриманих даних є акредитація лабораторій за стандартом ISO / IEC 17025:2019, відповідно до якого визначають компетенції лабораторій щодо якості результатів їх досліджень. Якщо розглянути питання впровадження зазначеного стандарту в практику випробувань зразків озброєння, а саме з огляду на імплементацію стандартів НАТО, то використання точних і надійних даних під час випробувань, які надходять від акредитованої лабораторії, дозволить мінімізувати технічні бар'єри для співпраці з європейськими виробниками озброєння.

Ключові слова: система озброєння; міжнародна співпраця; випробування озброєння; безпілотна система; статистичний метод; оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Розвиток сучасної військової техніки обумовлює появу нових методів ведення бойових дій, сприяє впровадженню в бойову практику використання великої кількості дистанційно керованих систем різного призначення. Однак для успішного виконання бойових завдань необхідно мати чітко

визначені тактико-технічні характеристики таких систем. Оскільки ці дані використовують для планування операцій, то достовірність характеристик і їх оцінювання в різноманітних умовах експлуатації є важливим фактором успішного виконання завдання. Саме тому процес дослідження технічних характеристик безпілотних комплексів у процесі їх випробування – це важливий етап у постановці таких систем на озброєння. Сама процедура приймальних випробувань має охоплювати не лише оптимальні умови навколишнього середовища, а й критичні умови використання конкретного комплексу. Дані про межі можливостей (спроможностей) зразка озброєння і його характеристики в різних умовах застосування дозволять оптимально й найбільш ефективно використовувати його під час виконання бойових завдань. Тому розроблення та впровадження методів опрацювання результатів випробувань є актуальним для забезпечення об'єктивного оцінювання тактико-технічних характеристик зразків безпілотних комплексів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. порушене питання є широко обговорюваним у колах науковців та практиків-випробовувачів військової техніки. Наприклад, в [1] розкрито передумови розвитку безпілотних технологій як важливого елемента сучасних військових операцій, проаналізовано законодавче та нормативне підґрунтя процедури приймання безпілотних комплексів на озброєння.

У матеріалах статті [2] побудовано кваліметричну модель формування етапів творення інформаційно-вимірювальної системи стадії підготовки випробувань зразків військової техніки. Розроблено етапи експертизи кваліметричної моделі на основі наявної поточної мети випробувань. Також обґрунтовано необхідну кількість параметрів, що вимірюються, їх точність, порядок аналізу та критерії ефективності моделі, зокрема: мінімальну похибку вимірювань під час проведення випробувань; вартість обладнання, що забезпечує необхідну точність; ресурс обладнання тощо.

Визначено найбільш доцільний інструмент системного підходу до прийняття рішень для побудови кваліметричної моделі інформаційно-вимірювальних систем.

У [3] розкрито питання щодо визначення та забезпечення якості продукції оборонного призначення, контролю за додержанням її відповідності встановленим вимогам, а також створення та впровадження системи якості, яка спроможна вирішувати завдання щодо оцінювання відповідності. Окремо було висвітлено термін “якість”, який можна трактувати як відповідність вимогам споживача або рівень його задоволеності. Щодо зразків оборонного призначення, то якість ототожнюється з ефективністю виконання бойового завдання. Безпосереднє застосування озброєння, систем військової техніки та спорядження в бойових умовах є найкращою перевіркою його ефективності, а саме придатності для використання за призначенням. Крім того, у статті розкрито актуальність обрання системи перевірки озброєння, здатної забезпечити вирішення проблем якості оборонної продукції.

У публікації [4] запропоновано методичний підхід до визначення пріоритетності напрямів вирішення проблемних питань розвитку системи випробувань озброєння та військової техніки. Окреслено орієнтовний перелік заходів, на основі яких може бути сформовано достатню множину варіантів розвитку алгоритмів розвитку. Наведено сукупність показників оцінювання альтернативних варіантів розвитку системи оцінювання зразків військової продукції.

У статті [5] за результатами проведеного аналізу чинних нормативних документів зроблено висновки щодо зміни статусу деяких стандартів НАТО в Україні з національного на військовий та введення обов'язковості застосування цих військових стандартів на підприємствах, установах та організаціях усіх форм власності, що виконують роботи для потреб оборони. Також виділено три групи військових стандартів, що прямо чи опосередковано регламентують вимоги до забезпечення єдності вимірювань та їх простежуваності в ході випробувань зразків озброєння та військової техніки, а також розглянуто конкретні вимоги до цих зразків за кожною групою. Згадані групи стандартів розроблені на основі угод зі стандартизації НАТО STANAG 4107, STANAG 4370 і STANAG 4704. Описано особливості випробувань зразків техніки за STANAG 4370, висвітлено питання щодо впровадження STANAG 4704 у повному обсязі в Україні. Окреслено труднощі в запровадженні стандартів НАТО в нашій державі та шляхи їх вирішення.

У [6] проаналізовано поточні проблеми впровадження та реалізації стандартів НАТО в безпековому та оборонному секторі. Автори аналізують регуляторне та юридичне управління в галузі національної безпеки та головні документи, пов'язані із сектором безпеки та оборони, що мають бути адаптовані в Україні відповідно до стандартів НАТО.

Ці стандарти надають нові можливості для розроблення, виробництва, продажу зброї та військового обладнання для української оборонної промисловості, а також відкривають нові сфери для співпраці із західними партнерами.

Публікація [7] присвячена проблемам створення та впровадження інтегрованої системи управління якістю підприємства, які виникли через необхідність імплементації вимог стандартів НАТО серії AQAP 2000 до вимог стандарту ISO 9001. У статті проаналізовано переваги та недоліки таких систем управління. Надано схему постачань продукції військового призначення замовнику, у якій передбачено сертифікацію системи управління якістю виробника зовнішнім органом з оцінювання відповідності та контроль за якістю продукції військовим представництвом, а також державне гарантування якості (ДГЯ). Авторами зазначено, що на виробничому підприємстві чи у випробувальній лабораторії повинна функціонувати система метрологічного забезпечення згідно зі стандартом ДСТУ ISO 10012.

У [8] розглянуто деякі питання впровадження та застосування міжнародних нормативних та нормативно-технічних документів, зокрема стандартів НАТО, під час проведення випробувань зразків озброєння. Визначено певні труднощі щодо співробітництва України з НАТО у сфері стандартизації, з-поміж яких варто виокремити відмінності організаційних структур систем стандартизації та відмінності структур фондів стандартів.

Публікація [9] присвячена особливостям випробувань, відповідності стандартам НАТО з гарантування якості (STANAG 4107) та вимогам до алгоритмів, методів і порядку проведення різного виду випробувань зразків озброєння та військової техніки. Однак у ній не проаналізовані в достатньому обсязі особливості впровадження стандартів НАТО в приймальні випробування.

Проблеми створення системи ДГЯ оборонної продукції відповідно до чинних стандартів НАТО проаналізовано в роботі [10]. Вказано нормативно-правові документи, які

вимагають створення такої системи, та проаналізовано основні напрямки цього процесу, а також запропоновано низку заходів щодо вирішення актуальних проблем забезпечення якості продукції та послуг оборонного призначення. Однак результати опублікованої дослідницької роботи потребують додаткового осмислення на сучасному етапі розвитку нормативної бази.

Формулювання завдання дослідження. На підставі проаналізованих публікацій та огляду порушених проблемних питань можна зробити висновок, що система технічного регулювання в оборонній сфері знаходиться на етапі становлення та переходу на міжнародні стандарти. Отже, питання розроблення та впровадження методів випробування відповідно до чинної нормативної бази, впровадження способів перевірки стійкості застосованих методів до зміни вхідних умов, а також створення однозначних математичних моделей із використанням статистичних методів для оцінювання результатів випробування безпilotних систем є надзвичайно актуальними на сьогодні.

Виклад основного матеріалу. Дослідження присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми оцінювання стійкості методів випробування зразків продукції. Оскільки джерелом інформації, на основі якої роблять висновок про відповідність сировини чи продукту певним нормам, є результати випробувань, то впевненість у їх достовірності може забезпечити підтвердження точності застосовуваного методу та довіру до результатів випробувань у цілому. На сьогодні таким способом підтвердження відповідності отриманих даних є акредитація лабораторій за стандартом ISO / IEC 17025 або оцінювання та визнання їх вимірювальних можливостей згідно з ДСТУ ISO 10012.

Акредитація передбачає аудит лабораторії незалежними експертами та офіційне визнання її компетентності.

Упровадження в роботу лабораторії набору розроблених документів, що регламентують порядок її роботи – системи управління якістю, є одним із дієвих способів показати, що дані досліджень є достовірними, а тому на них можна покластися для прийняття рішень щодо придатності продукції. З іншого боку, стандартизація процесів лабораторного аналізу гарантує достатню точність отриманих даних, а можливі помилки в результатах випробування зведені до мінімуму.

Отже, одним із показників правильності роботи лабораторії є надання нею документальних доказів придатності методів випробування для отримання достовірних результатів, а саме верифікація методів випробування.

Верифікація у виробничій діяльності – це процедура, що дає високий ступінь упевненості в тому, що конкретний процес, метод або система буде послідовно приводити до результатів, які відповідають заздалегідь встановленим критеріям прийнятності. Дослідження мають комплексний характер. Метою верифікації є підтвердження стабільності результатів випробувань зразка продукції в разі зміни вхідних параметрів випробувань, тобто стабільності методу до зовнішніх умов.

При цьому у валідаційну модель вводиться змінна величина – ознака, що характеризує вхідні параметри в ході випробувань. Такими ознаками можуть бути зміни оператора або

умов навколишнього середовища, або часових проміжків між випробуваннями (стабільність у часі).

Водночас часто виникає питання взаємозв'язку ознаки та результатів випробувань: чи зміняться результати випробувань у разі інших вхідних параметрів.

Статистичний метод, який використовується для дослідження таких взаємозв'язків, називається кореляційним аналізом. Він полягає у визначенні ступеня зв'язку між двома випадковими величинами X та Y .

Для оцінювання інтенсивності взаємозв'язку в кореляційному аналізі використовують абсолютну величину (модуль) спеціального показника – коефіцієнта кореляції, абсолютне значення якого знаходиться в межах від 0 до 1. Коефіцієнт кореляції дає кількісну оцінку статистичного взаємозв'язку між результатами вимірів та показує, яка частка варіативності залежної змінної пояснюється регресійною моделлю. Тобто цей показник у застосуванні до результатів випробувань можна пояснити їх близькістю в базовому експерименті (випробування проводяться в первинних нормалізованих початкових умовах) і результатів експерименту, у разі дії однієї з ознак (вплив змін часу, навколишнього середовища та оператора під час випробувань тощо).

Розглянемо процедуру проведення аналізу. Запропонований тест забезпечує визначення того, чи призведе зміна вхідних параметрів проведення випробувань до зміни отриманих результатів. Для його виконання проводять два послідовні випробування одного і того ж зразка. При цьому щоразу всі вхідні параметри експерименту зберігаються без змін, окрім одного, вплив якого на результати випробувань досліджується цим тестом.

Для оцінювання результатів випробування може бути застосовано математичний апарат обрахунку параметричної кореляції (коефіцієнт кореляції Пірсона).

Передумовами застосування цього методу є такі: усі спостереження є взаємно незалежними; спостереження мають нормальний закон розподілу.

Опис методу

Значення коефіцієнта кореляції розраховуємо за такою формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}) (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

де X_i – i -те значення результату випробувань у ході першого експерименту (нормалізовані умови);

$\bar{X}$ – середнє арифметичне значення результатів випробувань під час першого експерименту (нормалізовані умови);

Y_i – i -те значення результату випробувань за час проведення другого експерименту (умови зі зміною параметра, вплив якого на результати випробувань досліджується за цим тестом);

$\bar{Y}$ – середнє арифметичне значення результату випробувань під час проведення другого експерименту (умови зі зміною параметра, вплив якого на результати випробувань досліджується за цим тестом);

N – кількість спостережень.

Отримані дані повинні аналізуватися. Обрахований результат знаходиться в межах $r = \pm 1$, де $r = +1$ означає прямо пропорційну кореляційну залежність (рис. 1); $r = -1$ – обернено пропорційну кореляційну залежність (рис. 2); $r^2 = 0$ означає 0% збігу, тобто нульову кореляційну залежність (рис. 3).

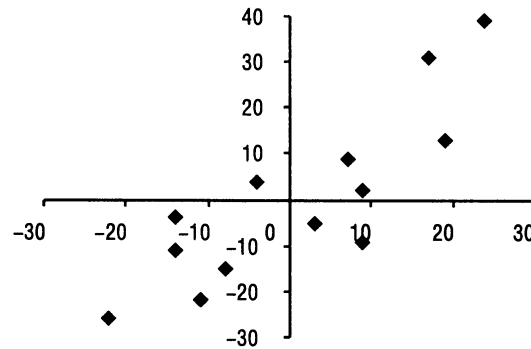


Рис. 1. Приклад прямо пропорційної кореляційної залежності

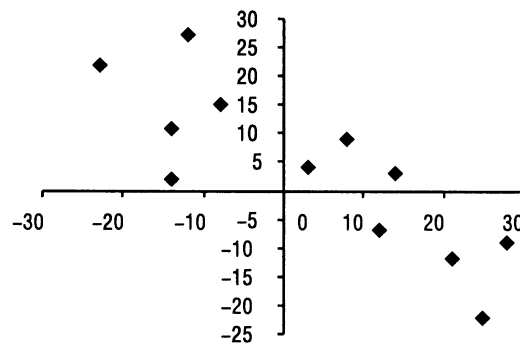


Рис. 2. Приклад обернено пропорційної кореляційної залежності

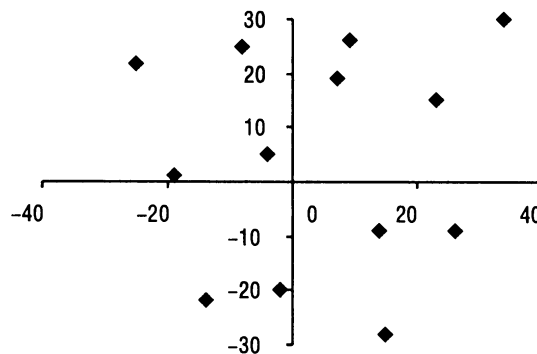


Рис. 3. Приклад нульової кореляційної залежності

Оскільки проводиться обрахунок випадкової величини, то в цьому разі значення лише одного коефіцієнта кореляції для висновку є недостатнім. Для надання достовірного результату оцінювання необхідно визначити значущість коефіцієнта кореляції, тобто перевірити, чи суттєво він відмінний від нуля. Це можна зробити за допомогою критерію

Стьюдента. Перевірятимемо гіпотезу рівності коефіцієнта кореляції та нульового значення (нульова гіпотеза). Для цього критерій значущості $t_{розр}$ розрахуємо за такою формулою:

$$t_{розр} = \frac{r_{xy} \sqrt{(N-2)}}{\sqrt{(1-r_{xy}^2)}}, \quad (2)$$

де r_{xy} – розрахований коефіцієнт кореляції;

N – кількість спостережень.

Якщо обчислена величина $t_{розр}$ більше або дорівнює табличному значенню коефіцієнта Стьюдента, взятого з $N = 2$ ступенів свободи, то нульова гіпотеза відкидається. Це означає, що коефіцієнт кореляції значно відрізняється від нуля (із вибраним рівнем значущості) і кореляція є підтвердженою. Тобто критерій статистичної прийнятності коефіцієнта кореляції визначають таким, що є задовільним, а знайдений зв'язок є статистично значущим (не випадковим) та правильно описує припущення методу про наявність кореляції між масивами результатів.

Для впевненості в тому, що метод обрахунку коефіцієнта кореляції може бути застосований до масиву результатів, необхідно пересвідчитися в нормальності розподілу цього масиву. Для визначення нормальності розподілу результатів проводиться розрахунок асиметрії та ексцесу (рис. 4), зокрема методом перевірки відхилення розподілу від нормального за допомогою параметрів асиметрії та ексцесу, за допомогою критерію Колмогорова – Смирнова.

Зазначені критерії розраховуємо таким чином:

1) визначаємо асиметрію розподілу результатів для масивів даних X та Y :

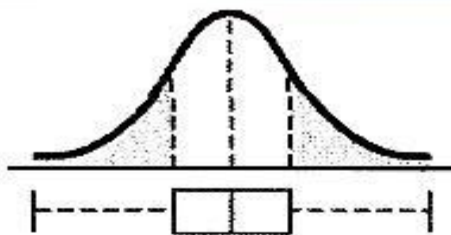
$$A_x = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{N \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \right)^3}; \quad A_y = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3}{N \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \right)^3}; \quad (3)$$

2) розраховуємо ексцес розподілу:

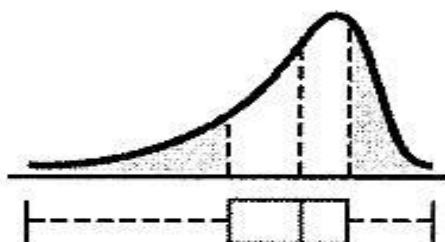
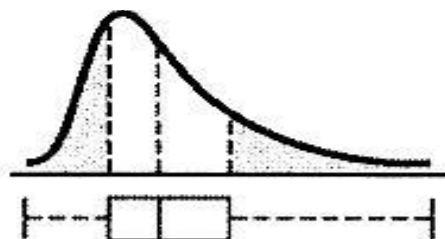
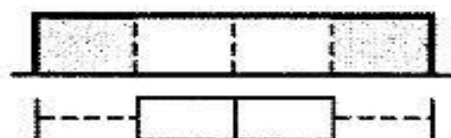
$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{N * \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \right)^4} - 3; \quad E_y = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{N * \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \right)^4} - 3. \quad (4)$$

Для перевірки нормальності розподілу за значеннями асиметрії та ексцесу обраховуємо для них критичні значення за формулами:

$$D(A) = \frac{6 * (N-1)}{(N+1) * (N+3)}, \quad D(E) = \frac{24 * (N-2)(N-3) * N}{(N-1)^2 * (N+3) * (N+5)}. \quad (5)$$



Дзвоноподібний (нормальний) розподіл

Дзвоноподібний (нормальний) розподіл
зі зворотною асиметрієюДзвоноподібний (нормальний) розподіл із
прямою асиметрією

Прямокутний розподіл

Рис. 4. Асиметрія розподілу результатів

Нормальність розподілу вважається підтвердженою, якщо виконуються рівняння перевірки виконання критеріїв:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)}; \quad |E| \leq \sqrt{D(E)}. \quad (6)$$

Отже, якщо знайдені значення асиметрії та ексцесу не перевищують своїх критичних значень за абсолютною величиною, то розподіл можна вважати нормальним.

Результати цієї перевірки надають докази правомірності використання методу обрахунку коефіцієнта кореляції для аналізу результатів випробувань, оскільки нормальність закону розподілу результатів є однією з передумов використання описаного методу.

Висновки. У статті запропоновано один із методів оцінювання придатності методик випробування зразків озброєння, який відрізняється простотою й універсальністю щодо різних вхідних критеріїв. Науковою новизною цього методу оброблення результатів є можливість виявити наявність грубих викидів у масиві даних, оскільки цей критерій чутливий до них. Крім того, використання коефіцієнта кореляції в ході аналізу дає можливість подальшого вдосконалення. Якщо на вибірку впливає ще одна величина, то, щоб «очистити» вплив кореляції між двома змінними від можливого впливу третьої, додатково вводиться поняття часткової кореляції, що значно розширює об'єктивність оцінювання. Перевірка нормальності закону розподілу результатів випробувань дозволяє підтвердити правильність застосування методу коефіцієнта кореляції. Якщо ж критерії нормальності не підтверджуються, то необхідно використовувати для оброблення результатів інші методи статистичного аналізу, наприклад, тест Зігеля – Тьюкі, призначений для аналізування рівності дисперсій двох масивів даних, закон розподілу яких відрізняється від нормального.

Отже, запропонований метод є універсальним та має широкі межі застосувань. Послідовно проводячи серії обрахунків, у разі зміни одного з параметрів, можна виявити стійкість конкретної методики випробувань до переліку чинників впливу, а за наявності відхилення результатів випробувань – провести його коригування та вдосконалення.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Випробування безпілотних авіаційних комплексів у бойових умовах / О. М. Походенко, Р. В. Місценко, Ю. В. Жежерун та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2024. № 4 (22). С. 106–114. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.13>
2. Кваліметрична модель високотехнологічної інформаційно-вимірювальної системи для підготовки та проведення випробувань / О. І. Потапов, Є. М. Тertiшнік, С. В. Ратушний, П. Л. Аркушенко // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2024. № 3 (21). С. 106–114. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.13>
3. Мирунко В. М., Андрієнко О. В., Дмитрієв В. А. Оцінка відповідності (сертифікація) як ключова складова забезпечення якості продукції оборонного призначення // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2024. № 2 (20). С. 60–64. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.08>
4. Павленко А. Г., Ларін В. В., Гапоненко Г. М. Методичний підхід до визначення пріоритетності напрямів розвитку системи випробувань озброєння та військової техніки у контексті оборонного планування // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2023. № 2 (16). С. 65–69. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.16.2023.09>
5. Деякі особливості застосування стандартів НАТО щодо забезпечення єдності вимірювань при випробуваннях виробів озброєння та військової техніки / В. В. Борщ, О. І. Вервейко, М. І. Світенко, А. О. Семироз // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Черкаси, 2023. № 1 (15). С. 26–33. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.04>

6. NATO Standards and Their Role in the Country's Defence Capability Ensuring / V. Haidak, Yu. Dyrman, Yu. Karpenko, O. Chebakov // *Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*. Cherkasy, 2024. № 2 (20). P. 134–139. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.18>
7. Немченко О. В., Кисилевська А. Ю., Костенко В. Л. Інтеграція вимог стандартів НАТО серії AQAP 2000 у систему управління якістю підприємства з виробництва військової техніки // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. № 4 (164). С. 42–52. <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.4.13>
8. Проблемні питання нормативно-технічного забезпечення проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки / І. М. Лаппо, Ю. М. Добришкін, М. О. Геращенко та ін. // *Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Черкаси, 2019. № 2 (2). С. 112–118. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15>
9. Деякі особливості метрологічного забезпечення випробувань озброєння та військової техніки відповідно до стандартів НАТО та провідних країн світу / В. В. Борщ, П. Л. Аркушенко, О. І. Вервейко та ін. / *Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Черкаси, 2019. № 2 (2). С. 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.05>
10. Проблеми створення системи державного гарантування якості оборонної продукції відповідно до стандартів НАТО / К. К. Кулагін, І. І. Шевченко, О. І. Солонець та ін. // *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2018. № 4 (111). С. 42–52.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2025.

REFERENCES

1. Pokhodenko, O. M., Mistsenko, R. V., & Zhezherun, Yu. V. et al. (2024). Vyprobuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u boiovykh umovakh [Testing of Unmanned Aviation Complexes in Combat Conditions]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 4 (22), 106–114. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.13> [in Ukrainian].
2. Potapov, O. I., Tertyshnik, Ye. M., Ratushnyi, S. V., & Arkushenko, P. L. (2024). Kvalimetrychna model vysokotekhnolohichnoi informatsiino-vymiriuvanoi systemy dlia pidhotovky ta provedennia vyprobuvan [Qualimetric Model of a High-Tech Information and Measuring System for the Preparation and Conduct of Tests]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 3 (21), 106–114. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.13> [in Ukrainian].
3. Myrunko, V. M., Andriienko, O. V., & Dmitriiev, V. A. (2024). Otsinka vidpovidnosti (sertyfikatsiia) yak kliuchova skladova zabezpechennia yakosti produktsii oboronnoho pryznachennia [Conformity Assessment (Certification) as a Key Component of Quality Assurance for Defence Products]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of*

Armament and Military Equipment Testing and Certification], 2 (20), 60–64. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.08> [in Ukrainian].

4. Pavlenko, A. H., Larin, V. V., & Haponenko, H. M. (2023). Metodychnyi pidkhid do vyznachennia priorytetnosti napriamiv rozvytku systemy vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky u konteksti oboronnoho planuvannia [A Methodological Approach to Determining the Priority of Directions for the Development of a System of Weapons and Military Technology Tests in the Context of Defense Planning]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (16), 65–69. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.16.2023.09> [in Ukrainian].

5. Borshch, V. V., Verveiko, O. I., Svitenko, M. I., & Semyroz, A. O. (2023). Deiaki osoblyvosti zastosuvannia standartiv NATO shchodo zabezpechennia yednosti vymiriuvan pry vyprobuvanniakh vyrobiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Some Features of the Application of Nato Standards Regarding Ensuring the Uniformity of Measurements During Testing of Armament and Military Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 1 (15), 26–33. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.15.2023.04> [in Ukrainian].

6. Haidak, V., Dyrman, Yu., Karpenko, Yu., Chebakov, O. (2024). NATO Standards and Their Role in the Country's Defence Capability Ensuring. *Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, 2 (20), 134–139. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.18>

7. Niemchenko, O. V., Kysylevska, A. Yu., Kostenko, V. L. (2020). Intehratsiia vymoh standartiv NATO serii AQAP 2000 u systemu upravlinnia yakistiu pidpriemstva z vyrobnytstva viiskovoi tekhniky [Integration of the Requirements of NATO Standards of the AQAP 2000 Series into the Quality Management System of an Enterprise for the Production of Military Equipment]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia [Aerospace Engineering and Technology]*, 4 (164), 42–52. <https://doi.org/10.32620/aktt.2020.4.13> [in Ukrainian].

8. Lappo, I. M., Dobryshkin, Yu. M., & Herashchenko, M. O., et al. (2019). Problemni pytannia normatyvno-tekhnichnoho zabezpechennia provedennia vyprobuvan zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Problematic Issues of Regulatory and Technical Support for Testing Samples of Weapons and Military Equipment]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (2), 112–118. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.15> [in Ukrainian].

9. Borshch, V. V., Arkushenko, P. L., & Verveiko, O. I., et al. (2019). Deiaki osoblyvosti metrolohichnoho zabezpechennia vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky vidpovidno do standartiv NATO ta providnykh krain svitu [Some Features of Metrological Support for Testing Weapons and Military Equipment in Accordance with NATO Standards and Leading Countries of the World]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 2 (2), 33–40. Cherkasy. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.2.2019.05> [in Ukrainian].

10. Kulahin, K. K., Shevchenko, I. I., & Solonets, O. I. et al. (2018). Problemy stvorennia systemy derzhavnoho harantuvannia yakosti oboronnoi produktsii vidpovidno do standartiv NATO [Problems of Creating a System of State Quality Assurance of Defense Products in Accordance with NATO Standards]. *Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist* [Standardization, certification, quality], 4 (111), 42–52 [in Ukrainian].

I. A. Omelchuk, A. M. Tokar, V. L. Rykun, I. V. Svystunovych

USE OF STATISTICAL METHODS FOR EVALUATING THE RESULTS OF TESTING UNMANNED SYSTEMS

The prolonged armed aggression against Ukraine and the global experience of using unmanned systems in armed conflicts over recent years have become an impetus for the creation of a separate branch of forces within the structure of the Armed Forces of Ukraine.

Today, there is a steady trend toward an increasing role of unmanned systems in armaments, which determines the need to expand the scope of development, design, and production of modern unmanned complexes for various areas of application. The complexity of the processes underlying the functioning of unmanned systems, the numerous elements and systems interconnected with each other, and the large number of diverse parameters and characteristics of unmanned system samples – all this necessitates their study and verification of the correctness of newly adopted technical solutions, as well as the implementation of existing ones during the development and production of unmanned systems. Research and standardization of their tactical and technical characteristics is a relevant task to ensure accurate planning of combat operations. For this purpose, developed weapon systems must undergo testing and characterization studies. Testing is the primary means of confirming compliance of existing characteristics with the declared tactical and technical requirements for equipment samples. Testing methods should provide for the use of standardized algorithms and procedures. Since the source of information on the basis of which conclusions can be drawn about the conformity of raw materials or products is the test results, confidence in their reliability can be ensured by confirming the reliability of the applied method.

At present, such a method of confirming the conformity of the obtained data is the accreditation of laboratories in accordance with the ISO / IEC 17025:2019 standard, which defines laboratory competencies regarding the quality of their test results. If the issue of implementing this standard in the practice of testing weapon systems is considered, particularly in view of the implementation of NATO standards, the use of accurate and reliable data obtained during testing from an accredited laboratory will make it possible to minimize technical barriers to cooperation with European arms manufacturers.

Keywords: *weapon system; international cooperation; weapons testing; unmanned system; statistical method; evaluation.*

Автори випуску

Андреев Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-2601-1491>

Наукові інтереси:

- космічні та геоінформаційні системи;
- інформаційно-обчислювальні технології.

Андрощук Руслан Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.
<https://orcid.org/0009-0006-8688-643X>

Наукові інтереси:

- оцінювання ефективності радіотехнічних систем;
- удосконалення систем геофізичного моніторингу;
- аналіз та оброблення геофізичних сигналів.

Бондаренко Юрій Леонідович – кандидат технічних наук, начальник факультету Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.
<https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>

Наукові інтереси:

- оптимізація функціонування складних технічних систем;
- інформаційні технології багатокритерійної оптимізації систем та об'єктів;
- створення нових та удосконалення наявних систем електрозабезпечення.

Бугайов Микола Вікторович – кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник начальника науково-дослідного відділу науково-дослідного управління Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-0899-9843>

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Буряк Сергій Петрович – доктор філософії, доцент кафедри Інституту воєнної історії, права та соціальних наук Національного університету оборони України.
<https://orcid.org/0000-0002-2847-0595>

Наукові інтереси:

- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- історичні аспекти російсько-української війни;
- розвиток озброєння та техніки у воєнних конфліктах 20 століття.

Гераймович Олександр Миколайович – старший викладач кафедри Державного університету «Житомирська політехніка». <https://orcid.org/0009-0004-5881-5592>

Наукові інтереси:

- цифрове оброблення сигналів.

Гончаренко Юрій Павлович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри Поліського національного університету. <https://orcid.org/0000-0002-2631-2956>

Наукові інтереси:

- методи цифрової обробки та розпізнавання радіосигналів;
- методи передачі інформації;
- методи автоматизації та управління енергетичними системами.

Гризо Андрій Аркадійович – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідної лабораторії Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. <https://orcid.org/0000-0003-2483-5953>

Наукові інтереси:

- радіолокаційні системи;
- оброблення сигналів, моделювання та імітація;
- експлуатація радіоелектронних систем.

Гринюк Юрій Володимирович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0002-9832-753X>

Наукові інтереси:

- удосконалення систем геофізичного моніторингу;
- аналіз та оброблення геофізичних сигналів.

Дубина Олександр Федорович – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-3448-6072>

Наукові інтереси:

- цифрове оброблення сигналів;
- телекомунікаційні мережі та системи.

Жуков Анатолій Олексійович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0001-9272-0966>

Наукові інтереси:

- інформаційно-комунікаційні системи.

Залізко Андрій В'ячеславович – ад'юнкт наукового відділу організації підготовки та атестації науково-педагогічних кадрів науково-методичного центру організації наукової та науково-технічної діяльності Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0009-0006-5263-6897>

Наукові інтереси:

- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту;
- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація застосування зброї термобаричної дії;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- організація проведення деконтамінації військ (сил).

Іщенко Дем'ян Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного управління Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0001-9743-3889>

Автори випуску

Наукові інтереси:

- дослідження складних інформаційних систем;
- моделювання операцій.

Іщенко Іван Анатолійович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0007-7150-1653>

Наукові інтереси:

- застосування мікропроцесорних пристроїв у системах електропостачання;
- застосування мікропроцесорів для модернізацій озброєння та військової техніки;
- дослідження шляхів оптимізації систем альтернативного живлення;
- математичне моделювання складних технічних систем.

Капля Ілля Олексійович – доктор філософії, старший викладач кафедри Інституту логістики та підтримки військ (сил) Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0000-0002-1424-4175>

Наукові інтереси:

- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту;
- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація застосування зброї термобаричної дії;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- організація проведення деконтамінації військ (сил).

Кенгерлі Алі Гусейнович – ад'юнкт наукового відділу організації підготовки та атестації науково-педагогічних кадрів науково-методичного центру організації наукової та науково-технічної діяльності Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0009-0005-5794-6221>

Наукові інтереси:

- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту;
- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація застосування зброї термобаричної дії;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- організація проведення деконтамінації військ (сил).

Клязника Володимир Вікторович – заступник начальника кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-3557-2052>

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Костирич Олександр Олексійович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. <https://orcid.org/0000-0003-3363-2015>

Наукові інтереси:

- радіолокаційні системи;
- формування та оброблення сигналів;
- синхронізація часу та частоти.

Маришук Людмила Мічеславівна – старший науковий співробітник науково-організаційного відділу Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

<https://orcid.org/0009-0000-4798-2169>

Наукові інтереси:

- складні термінологічні системи;
- організація наукових досліджень.

Мещеряков Іван Сергійович – доктор філософії, доцент кафедри Інституту логістики та підтримки військ (сил) Національного університету оборони України.

<https://orcid.org/0000-0001-5797-0735>

Наукові інтереси:

- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту;
- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація застосування зброї термобаричної дії;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- організація проведення деконтамінації військ (сил).

Мірошніченко Сергій Іванович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0007-2076-041X>

Наукові інтереси:

- автоматизовані системи управління;
- інформаційні системи.

Нетребко Руслан Васильович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-3212-5249>

Наукові інтереси:

- програмування;
- інформаційні технології.

Нікітін Анатолій Анатолійович – доктор філософії, доцент, професор кафедри Інституту логістики та підтримки військ (сил) Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0000-0003-1487-0616>

Наукові інтереси:

- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту;
- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація застосування зброї термобаричної дії;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- організація проведення деконтамінації військ (сил).

Автори випуску

Оборонов Микола Іванович – старший викладач кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. <https://orcid.org/0000-0002-9769-4568>

Наукові інтереси:

- організація та підтримання взаємодії між складовими, які беруть участь у протиповітряній обороні;
- розроблення способів сумісного застосування підрозділів протиповітряної оборони та радіоелектронної боротьби.

Омельчук Ігор Анатолійович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0003-4674-0058>

Наукові інтереси:

- вимірювальні системи;
- безпілотні літальні апарати;
- системи автоматичного керування.

Парфенюк Василь Григорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

<https://orcid.org/0000-0002-6149-7124>

Наукові інтереси:

- цифрове оброблення сигналів;
- теорія цифрового зв'язку.

Пилипович Олександр Михайлович – викладач кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. <https://orcid.org/0000-0001-5733-7294>

Наукові інтереси:

- радіолокаційні системи;
- застосування та експлуатація радіоелектронних систем.

Пількевич Ігор Анатолійович – заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0001-5064-3272>

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних систем та процесів;
- боротьба в електромагнітному середовищі;
- кіберзахист.

Полещук Іван Іванович – старший викладач кафедри Поліського національного університету. <https://orcid.org/0009-0000-6783-3013>

Наукові інтереси:

- методи цифрової обробки та розпізнавання радіосигналів;
- методи передачі інформації;
- методи оптимального оброблення складних радіосигналів.

Рикун Віталій Леонідович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0006-3264-9201>

Наукові інтереси:

- дослідження електромеханічних систем.

Романенко Ігор Олександрович – старший викладач кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

<https://orcid.org/0000-0002-0187-1778>

Наукові інтереси:

- радіолокаційні системи;
- застосування та експлуатація радіоелектронних систем.

Романько Вадим Анатолійович – доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0008-5749-284X>

Наукові інтереси:

- технології програмування;
- вебпрограмування;
- нейронні мережі;
- системи наведення;
- квантова механіка.

Сампир Олександр Миколайович – доктор філософії, начальник логістики – заступник начальника Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

<https://orcid.org/0000-0002-3564-1997>

Наукові інтереси:

- забезпечення військ (сил);
- логістичне забезпечення;
- озброєння та військова техніка;
- підтримка військ (сил);
- посилення живучості військ (сил);
- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту.

Свистунович Іван Володимирович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0004-6832-6397>

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних технічних систем;
- дослідження систем електропостачання та релейного захисту.

Соболенко Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

<https://orcid.org/0009-0006-1662-2244>

Наукові інтереси:

- телекомунікаційні мережі та системи;
- математичне моделювання складних технічних систем.

Соколовський Олег Феліксівич – кандидат технічних наук, доцент кафедри Поліського національного університету. <https://orcid.org/0000-0001-8440-7462>

Наукові інтереси:

- цифрові системи керування та мікроконтролери;
- методи автоматизації та управління енергетичними системами.

Срібний Олександр Миколайович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0009-0002-2624-9229>

Наукові інтереси:

- машинне навчання;
- інформаційні технології;
- штучний інтелект.

Стрінада Віктор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідного відділу – заступник начальника науково-дослідного управління Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0002-0604-7673>

Наукові інтереси:

- безпілотні системи та комплекси;
- математичне моделювання складних технічних систем.

Тертишний Богдан Іванович – доктор філософії, доцент кафедри Інституту логістики та підтримки військ (сил) Національного університету оборони України. <https://orcid.org/0000-0002-9060-761X>

Наукові інтереси:

- організація хімічного, біологічного, радіологічного, ядерного захисту;
- захист від зброї масового знищення (ураження);
- посилення живучості військ із застосуванням аерозолів;
- організація застосування зброї термобаричної дії;
- організація системи попередження й оповіщення військ (сил) про хімічні, біологічні, радіологічні, ядерні загрози (інцидент);
- організація проведення деконтамінації військ (сил).

Токар Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. <https://orcid.org/0000-0001-7534-2820>

Наукові інтереси:

- методи цифрової обробки та розпізнавання радіосигналів;
- методи радіопеленгації;
- тактика застосування безпілотних літальних апаратів.

Яковенко Віталій Адольфович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Поліського національного університету. <https://orcid.org/0009-0009-5767-2661>

Наукові інтереси:

- методи автоматизації та управління енергетичними системами;
- системи управління енергосистеми СКАДА;
- методи передачі інформації.

ДЛЯ НОТАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Збірник наукових праць

Випуск 29

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 24.12.2025. Формат 60 × 84 / 8
Ум. друк. арк. 21,39. Тираж 50 прим. Зам. 1003 опер.

Друкарня ЖВІ

10004, м. Житомир, просп. Миру, 22