

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

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

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**25 (I)**

**Житомир**  
**2023**

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 25 (I) / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2023. – 120 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2023.25>

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 № 4 від 21.12.2023.

**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 (Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Україна);

ЖУРАВСЬКИЙ Ю. В., доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

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

КОВБАСЮК С. В., лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Державний університет «Житомирська політехніка», Україна);

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

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

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

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

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

**ISSN 2076-1546**

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

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21859-11759 ПР від 21.12.2015.

# ЗМІСТ

<b>Бугайов М. В., Закіров С. В., Клязника В. В., Гончаров Д. О.</b> Автоматичний аналіз завантаженості радіочастотного спектра та селекція сигналів .....	4
<b>Пількевич І. А., Мірошніченко С. І.</b> Модель інформаційної системи електронного документообігу територіально розподілених підрозділів організації .....	19
<b>Дубина О. Ф., Соболенко С. О., Пулеко І. В., Андрєєв О. В., Денисюк А. Ю.</b> Підхід до оцінювання ефективності комплексної системи охорони .....	31
<b>Нагорнюк О. А.</b> База даних для автоматизованого розпізнавання типу безпілотного авіаційного комплексу за його радіосигналами.....	39
<b>Міхєєв Ю. І., Лобода В. В., Войтко Т. М., Гладич Р. І.</b> Автоматизована система пошуку інформації в мережі Інтернет .....	50
<b>Поздняков В. В., Бугайов М. В.</b> Аналіз акустичних сигналів засобів повітряного нападу.....	58
<b>Сидорчук О. Л., Залевський В. Й., Ковальчук В. В.</b> Математична модель дослідження коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів фазованих антенних решіток.....	76
<b>Наумчак О. М.</b> Аналіз підходів до видалення хмарності на космічних знімках дистанційного зондування Землі.....	90
<b>Беспалко І. А., Наумчак Л. М., Пекарєв Д. В.</b> Проектування макета системи нечіткої логічної класифікації космічних апаратів у процесі аналізу космічної обстановки.....	104
<b>Автори випуску</b> .....	115
<b>Вимоги до оформлення матеріалів</b> .....	119

М. В. Бугайов, С. В. Закіров, В. В. Клязника, Д. О. Гончаров

## АВТОМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАВАНТАЖЕНОСТІ РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ТА СЕЛЕКЦІЯ СИГНАЛІВ

*Постійне збільшення кількості радіоелектронних засобів призводить до зростання завантаженості радіочастотного спектра й ускладнення радіоелектронної обстановки. За таких умов для оперативного виявлення та селекції радіосигналів у системах радіомоніторингу необхідно використовувати автоматичні алгоритми. Метою статті є розроблення алгоритмів і рекомендацій щодо їх практичної реалізації для автоматизації процесу аналізу завантаженості радіочастотного спектра та селекції сигналів у широкому динамічному діапазоні за високої завантаженості смуги частот аналізу в умовах апріорної невизначеності щодо рівня шуму. Для досягнення поставленої мети було розроблено узагальнений алгоритм аналізу радіочастотного спектра, алгоритм оброблення в частотній області, алгоритм аналізу частотних каналів, а також наведено приклади аналізу ділянки спектра з високою завантаженістю та надано рекомендації щодо реалізації розроблених алгоритмів. Залежно від мінливості потужності шуму в смузі частот аналізу передбачено адаптивну зміну часового інтервалу його оцінювання, що зменшить обчислювальну складність. В умовах нерівномірного рівня шуму або широкого динамічного діапазону сигналів для аналізу частотних каналів запропоновано використовувати спеціальну тестову статистику для визначення їх заповненості. У ході експериментальних досліджень було проаналізовано записи у смугах частот 900 МГц, 1800 МГц та 2100 МГц. Встановлено, що розроблені алгоритми забезпечують правильне оцінювання завантаженості визначених ділянок радіочастотного спектра та селекцію сигналів за їх динамічного діапазону не менше 35 дБ і завантаженості до 92%. Запропоновані алгоритми не вимагають калібрування апаратури у разі коливань характеристик окремих елементів системи та зміни радіоелектронної обстановки і можуть бути реалізовані в наявних та перспективних автоматичних системах радіомоніторингу.*

**Ключові слова:** *радіочастотний спектр; завантаженість смуги частот; селекція сигналів; тестова статистика; частотний канал.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Сучасний етап розвитку техніки супроводжується постійним збільшенням кількості радіоелектронних засобів, що призводить до зростання завантаженості радіочастотного спектра (РЧС) та ускладнення радіоелектронної обстановки (РЕО) [1–3]. У таких умовах оперативне виявлення сигналів із заданими параметрами та пошук незайнятих частотних смуг у ручному та автоматизованому режимах стають малоефективними. Це пов'язано із розширенням смуг панорамного огляду сучасних радіоприймальних пристроїв і, як наслідок, зростанням імовірності одночасного приймання потужних і слабких сигналів в одній смузі частот, ускладненням частотно-часової структури радіосигналів та динамічною зміною РЕО.

© М. В. Бугайов, С. В. Закіров, В. В. Клязника, Д. О. Гончаров, 2023

Розглянуті фактори вимагають переходу до автоматичного аналізу завантаженості РЧС та селекції сигналів у системах радіомоніторингу. Тому розроблення автоматичних алгоритмів для аналізу РЧС і рекомендацій щодо їх реалізації є актуальним науково-прикладним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні роки спостерігається значне збільшення кількості наукових публікацій, присвячених розробленню автоматичних методів та алгоритмів аналізу РЧС. Зокрема, у [4] для аналізу спектра запропоновано використовувати технологію машинного навчання на основі методу опорних векторів. У [5] для визначення частотних меж сигналів рекомендують застосовувати вейвлет-перетворення. Для оцінювання рівня шуму та завантаженості РЧС у [6] описано нове рішення на основі байєсівського підходу, а в [7] запропоновано використовувати згортковий автокодувальник. Для одночасного виявлення та оцінювання параметрів кількох сигналів у [8] пропонують нейронну мережу з глибоким навчанням SigdetNet, на вхід якої подається енергетичний спектр з його подальшим логарифмічним перетворенням для підсилення сигналів. У [9] радять виявляти зайняті ділянки РЧС шляхом аналізу багатьох частотних каналів, на які розділена уся смуга пропускання приймача.

Ітеративні методи дозволяють визначати вільні ділянки РЧС в умовах динамічної зміни РЕО за невідомої потужності шуму, а динамічний діапазон сигналів, що можуть оброблятися, обмежується лише рівнем бічних пелюсток віконної функції. У [10–11] розглянуто ітеративні методи виявлення радіосигналів із використанням тестових статистик. У [12] запропоновано швидку реалізацію ітеративного алгоритму, а в [13] ітеративний алгоритм рекомендовано використовувати для оцінювання рівня шуму в умовах невідомого рівня завантаженості РЧС. Алгоритм із ітеративним пороговим обробленням значень тестової статистики та частотних відліків описано в [14]. Такий підхід забезпечує суттєве зменшення обчислювальної складності ітеративного алгоритму. Для виявлення вільних ділянок РЧС за його високої завантаженості у [15] запропоновано використовувати метод, що враховує властивості моди гістограми шумових частотних відліків.

Проте у розглянутих публікаціях не вирішено завдання автоматизації роботи запропонованих алгоритмів, зокрема адаптивної зміни їх параметрів в умовах складної та динамічної РЕО.

**Формулювання завдання дослідження.** Задано ділянку РЧС, у якій може розміщуватися декілька сигналів із невідомими частотно-часовими параметрами. Рівень шуму в заданій смузі частот є невідомим, практично однаковим на усіх частотах і може змінюватися в часі, причому швидкість переміни потужності шуму набагато менша за швидкість коливань рівнів сигналів. Необхідно автоматично оцінити рівень шуму, знайти частотні межі зайнятих ділянок РЧС та провести селекцію сигналів за шириною спектра та потужністю.

**Метою** статті є розроблення алгоритмів і рекомендацій щодо їх практичної реалізації для автоматизації процесу аналізу завантаженості РЧС та селекції сигналів у широкому динамічному діапазоні за високої завантаженості смуги частот аналізу в умовах апріорної невизначеності щодо рівня шуму.

## Виклад основного матеріалу

### 1. Узагальнена блок-схема алгоритму автоматичного аналізу РЧС

Для визначення зайнятих ділянок РЧС необхідно постійно або періодично аналізувати визначену смугу частот [1]. На рис. 1 наведено узагальнену блок-схему алгоритму автоматичного аналізу РЧС. Спочатку із вхідного потоку відліків сигналу береться вибірка довжиною  $N$  (блок 1) і зберігається в буфер (блок 3). Для неї в блоці 5 розраховується вектор відліків спектральної щільності потужності (СЩП)  $P_{xx}$  на основі періодограми Уелча, а також обчислюється значення тестової статистики для даного вектора. Як тестову статистику використано коефіцієнт варіації вектора частотних відліків енергетичного спектра, що розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення [12]. У разі перевищення значення тестової статистики заданого порога приймається рішення, що в смузі частот аналізу є сигнальні відліки (блок 6). Для їх виявлення необхідно оцінити рівень шуму  $P_{\xi}$ , розрахувати на основі цього значення поріг та провести порогове оброблення частотних відліків. Оскільки потужність шуму змінюється, як правило, набагато повільніше порівняно з потужністю сигналів, то його рівень доцільно оцінювати не постійно, а з деяким періодом  $\Delta t$ . Причому значення  $\Delta t$  рекомендовано змінювати в ході роботи алгоритму. На початку  $\Delta t$  доцільно обирати невеликим (10–60 с), оскільки невідома динаміка зміни рівня шуму в смузі частот у місці проведення вимірювань, та провести близько 10–30 вимірювань рівня шуму. Після цього потрібно розрахувати коефіцієнт варіації  $V$  для вимірних значень  $P_{\xi}$ . Якщо значення  $V$  не перевищує 0,1, то можна збільшувати інтервал  $\Delta t$  до 10 хв, а потім до однієї години. Обирати довший інтервал не рекомендовано, оскільки в разі зміни часу доби можливі значні коливання рівня фоновому шуму, особливо в містах. За  $V > 0,1$  можна зменшити значення  $\Delta t$  до 1 с. Оцінювання рівня шуму необхідно обов'язково проводити під час переналаштування приймача на іншу смугу частот, а також для заміни окремих елементів радіочастотного тракту системи радіомоніторингу (антен, кабелів зниження, підсилювачів, фільтрів тощо).

У разі відсутності сигналів, якщо поточний час  $t_i$  перевищує тривалість оброблення попереднього буфера відліків сигналу  $t_{i-1}$  на величину  $\Delta t$  (блок 4), проводиться оцінювання рівня шуму (блок 2), це значення в подальшому використовується для розрахунку порога. При цьому обробляється наступний фрагмент сигналу – і дані в буфері оновлюються.

Якщо в поточний момент часу  $t_i$  було прийнято рішення про наявність у смузі частот аналізу сигналів (блок 6), то залежно від того, виконується чи ні умова  $t_i \geq t_{i-1} + \Delta t$  (блок 7), може проводитися оцінювання рівня шуму на основі значень його потужності у вільних частотних каналах (блок 8) або визначення зайнятих каналів (блок 9) із використанням попередньої оцінки потужності шуму.

У блоці 10 проводиться селекція сигналів у виявлених частотних каналах. На даному етапі оброблення її доцільно здійснювати за двома параметрами: шириною смуги частотного каналу та максимальним рівнем потужності сигналу в ньому.

Ширина частотного каналу вимірюється на рівні порога. Хоча можливі й інші варіанти, наприклад, на рівні -3 дБ або -26 дБ від максимального рівня сигналу в каналі. Мінімальне та максимальне значення ширини смуги каналу, за якими здійснюється селекція для комплексного сигналу, можуть змінюватися в межах від 0 до значення частоти дискретизації.

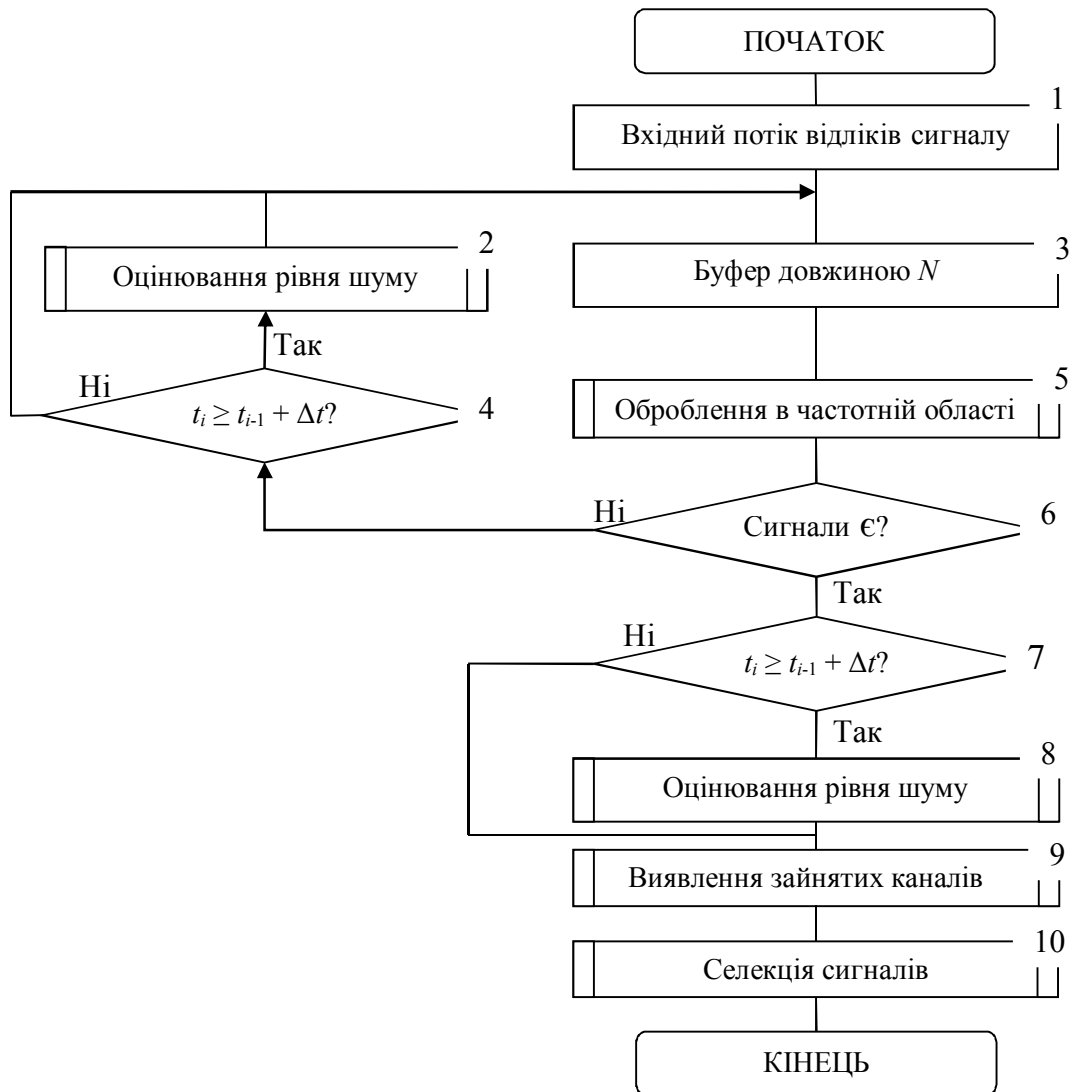


Рис. 1. Узагальнена блок-схема алгоритму автоматичного аналізу РЧС

У разі селекції сигналів за рівнем потужності мінімальне граничне значення доцільно обирати не менше рівня порога виявлення, а максимальне – не більше максимального значення потужності частотного відліку в смузі частот аналізу. Причому граничні значення потужностей доцільно задавати в децибелах. Вони будуть вказувати, на скільки децибел нижній поріг перевищує рівень шуму, а верхній менший за максимальний рівень сигналу в смузі частот аналізу.

Після виявлення та селекції за заданими параметрами частотних каналів можна реалізувати процедуру розпізнавання виду модуляції сигналів. Уточнення початку та закінчення сигналу у виявлених частотних каналах в межах буфера довжиною  $N$  відліків можна проводити із використанням запропонованого в [16] методу.

## 2. Алгоритм оброблення в частотній області

Оброблення в частотній області полягає в розрахунку СЦП, визначенні частотних меж сигналів та оцінюванні рівня шуму із використанням ітеративного алгоритму на основі тестових статистик [11, 13–14]. Блок-схему алгоритму оброблення в частотній області, що відповідає блокам 5 та 6 алгоритму автоматичного аналізу РЧС, наведено на рис. 2.

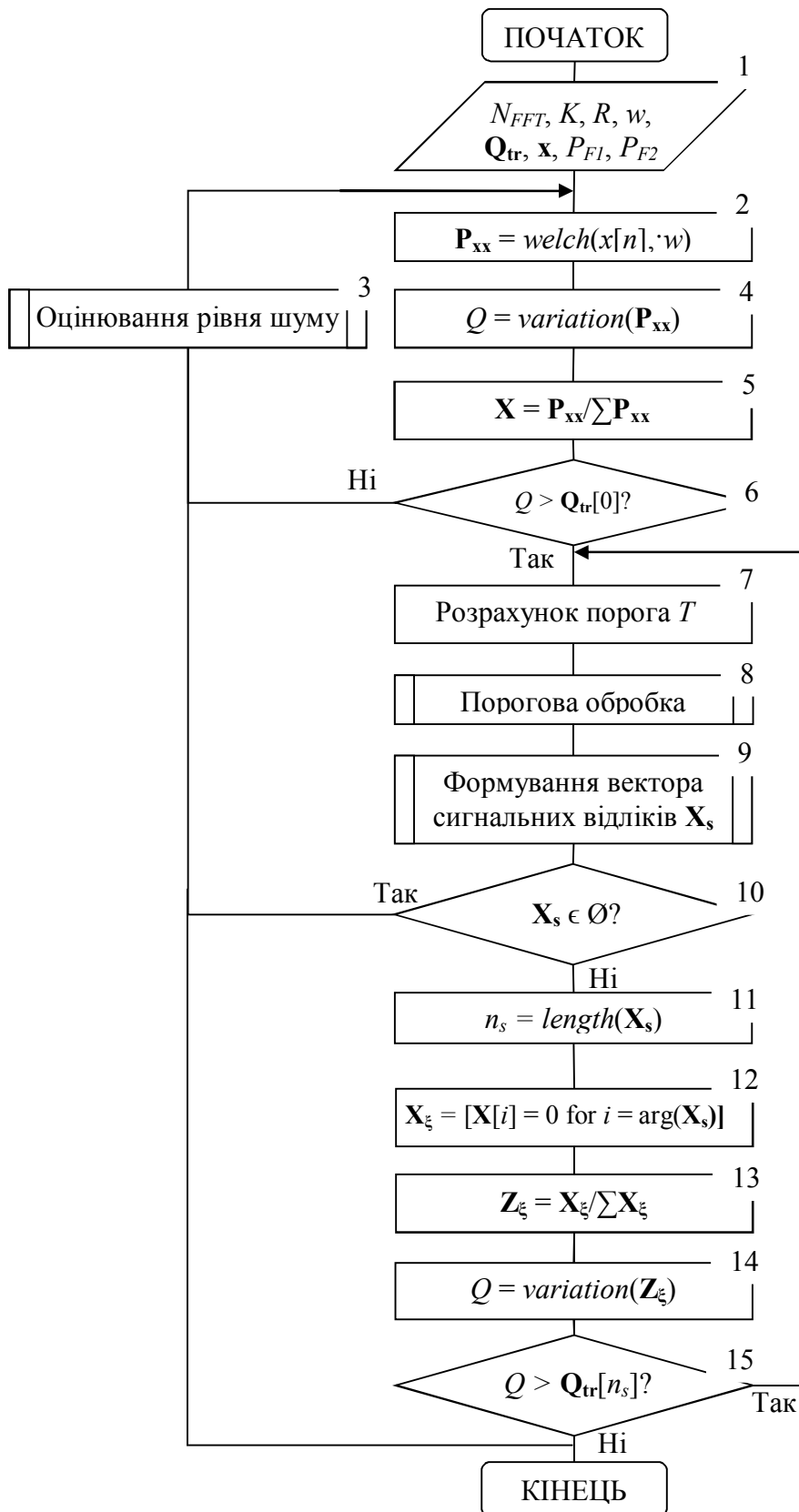


Рис. 2. Блок-схема алгоритму оброблення в частотній області

Вхідними даними алгоритму (блок 1) є параметри періодограми Уелча (довжина вікна швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)  $N_{FFT}$ , кількість фрагментів сигналу  $K$ , що накопичуються, кількість відліків сигналу  $R$ , які перекриваються, тип віконної функції  $w$ ),



вектор порогових значень тестової статистики  $\mathbf{Q}_{tr}$ , вектор відліків прийнятого сигналу  $\mathbf{x}$  та два значення ймовірності хибної тривоги:  $P_{F1}$  визначає ймовірність хибного рішення щодо наявності або відсутності у смузі частот аналізу сигналів, яке приймається на основі порівняння розрахованого значення коефіцієнта варіації вектора СЦП із пороговим; значення  $P_{F2}$  визначає ймовірність хибного рішення щодо належності частотних відліків шуму, які перевищили поріг, до сигнальних.

Вектор  $\mathbf{Q}_{tr}$  має довжину  $N_{FFT}$ , а кожен його елемент є функцією від статистичних характеристик коефіцієнта варіації  $Q$  вектора відліків СЦП шуму, що розраховується за їх випадкового відкидання. Коефіцієнт варіації  $Q$  є інтегральною характеристикою, яка залежить від усіх значень елементів вибірки. У кожній вибірці енергетичного спектра шуму через його обмежену довжину і випадковість різна кількість відліків, що перевищують деякий поріг. Тому для різних вибірок значення коефіцієнта варіації може бути однаковим. Тобто залежність між імовірністю хибної тривоги  $P_{F1}$  та коефіцієнтом варіації  $Q$  є неоднозначною і не може бути отримана аналітично.

Відповідно до центральної граничної теореми, значення коефіцієнта варіації підпорядковані нормальному розподілу. Порогове значення коефіцієнта варіації для  $i$ -ї ітерації в [17] запропоновано розраховувати за таким виразом:

$$Q_{tr}(i) = m_Q(i) + \alpha(P_{F1})\sigma_Q(i), \quad (1)$$

де  $m_Q(i)$  – середнє значення коефіцієнта варіації для  $i$ -ї ітерації;

$\sigma_Q(i)$  – значення середньоквадратичного відхилення коефіцієнта варіації для  $i$ -ї ітерації;

$\alpha$  – коефіцієнт, що визначається значенням  $P_{F1}$ .

Значення  $m_Q$  та  $\sigma_Q$  залежать від параметрів періодограми Уелча:  $N_{FFT}$ ,  $K$ ,  $R$  та типу віконної функції. Проте ця залежність від двох останніх параметрів є досить слабкою, і нею можна знехтувати. Зазначене спрощення є справедливим, оскільки варіації значень  $m_Q$  та  $\sigma_Q$ , у разі зміни  $R$  та типу вікна, набагато менші за їх середні значення.

Функціональну залежність  $\alpha(P_{F1})$  у вигляді суми експоненти та нелінійного доданка наведено в [17]:

$$\alpha(P_{F1}) = a \exp(-b(P_{F1})^{0,25}) + c(P_{F1})^{0,65}, \quad (2)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, отримані в результаті апроксимації.

У табл. 1 надано значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для деяких значень довжини вікна ШПФ. У ході зміни параметрів періодограми Уелча змінюватимуться статистичні характеристики коефіцієнта варіації, проте його розподіл буде наближено нормальним. Тому значення коефіцієнтів для розрахунку  $\alpha(P_{F1})$  можна брати з табл. 1 для необхідного значення  $N_{FFT}$  та довільних параметрів періодограми Уелча.

На основі виразу (1) із використанням залежності (2) можна розрахувати вектор порогових значень коефіцієнта варіації  $\mathbf{Q}_{tr}$ .

Значення коефіцієнтів  $a, b, c$ 

$N_{FFT}$	Значення коефіцієнтів		
	$a$	$b$	$c$
1024	4,6893	8,2741	-19,2004
2048	4,6013	9,8323	-30,8733
4096	4,5021	10,8626	-47,1718
8192	4,3881	12,2829	-69,8118

Оскільки потужність шуму на початковому етапі роботи алгоритму невідома, то в блоці 5 проводиться нормування вектора частотних відліків  $\mathbf{P}_{xx}$  до енергії. У разі перевищення розрахованим значенням  $Q$  порогового значення  $\mathbf{Q}_{tr}[0]$  (блок 6) оброблення вектора відліків СЩП продовжується. У протилежному випадку вважається, що в прийнятій реалізації лише шум, тому проводиться оцінювання його рівня (блок 3) та оброблення наступного фрагмента прийнятої реалізації.

У блоці 7 розраховується значення порога  $T$  із використанням заданої ймовірності хибної тривоги  $P_{F2}$ . Розподіл щільності ймовірностей шумових відліків періодограми Уелча підпорядкований закону хі-квадрат із  $2K$  ступенями свободи.

У разі оброблення комплексного сигналу значення порога  $T$  обчислюється як квантиль розподілу хі-квадрат рівня  $P_{F2}$ . Із використанням апроксимації Вілсона – Хілферті квантилів розподілу хі-квадрат [18] значення порога  $T$  можна розрахувати за таким виразом:

$$T = \frac{1}{N_{FFT} - n_s} \left( 1 - \frac{1}{8,64K} + u \sqrt{\frac{1}{8,64K}} \right)^3, \quad (3)$$

де

$$u = \frac{1,24 + 0,85H^{0,657}}{1 + 0,0001H^{-3} + \frac{2,38}{H}}, \quad H = -\ln \left( \frac{P_{F2}}{1 - P_{F2}} \right). \quad (4)$$

За наявності в смузі частот аналізу кількох сигналів із різними рівнями потужності, деякі слабкі сигнали можуть не перевищити вказаного порога і будуть пропущені на першій ітерації. Тоді значення порога  $T$  може розраховуватися кілька разів залежно від динамічного діапазону сигналів та завантаженості смуги частот аналізу.

Перевищення розрахованим значенням тестової статистики її порогового значення вказує лише на те, що в прийнятій реалізації є сигнальні відліки або із ймовірністю  $P_{F2}$  є не менше одного шумового відліку. Для визначення номерів сигнальних відліків у блоці 8 проводиться порівняння значень елементів вектора  $\mathbf{X}$  зі значенням порога  $T$ . У разі його перевищення в блоці 9 формується вектор сигнальних відліків  $\mathbf{X}_s$ . Через мінливість шуму у ході ітеративного порогового оброблення можлива така ситуація, коли жоден із частотних відліків не перевищує заданого порога  $T$ , а розраховане значення тестової статистики  $Q$  перевищить порогове  $\mathbf{Q}_{tr}[n_s]$ . У такому разі алгоритм зациклюється. Для уникнення подібної ситуації в блоці 10 здійснюється перевірка: чи були за цієї ітерації

виявлені сигнальні відліки. Якщо вектор  $\mathbf{X}_s$  порожній, то проводиться оцінювання рівня шуму й обробляється наступний фрагмент сигналу. У протилежному разі визначається кількість сигнальних відліків  $n_s$  (блок 11).

У блоці 12 формується вектор шумових відліків  $\mathbf{X}_\xi$  шляхом обнулення елементів вектора  $\mathbf{X}$ , які перевищили поріг  $T$ . У блоці 13 проводиться нормування до енергії та формується вектор  $\mathbf{Z}_\xi$ . У блоці 14 розраховується значення тестової статистики для вектора  $\mathbf{Z}_\xi$ , яке порівнюється з її пороговим значенням  $\mathbf{Q}_{tr}[n_s]$  для виявленої кількості сигнальних відліків  $n_s$ . У разі перевищення даного порога вважається, що у векторі  $\mathbf{Z}_\xi$  ще є сигнальні відліки та процедура їх виявлення (блоки 7–15) повторюється. Інакше оцінюється рівень шуму  $L_\xi$  за таким виразом [13]:

$$L_\xi = \frac{1}{N_\xi} \sum_{k=1}^{N_\xi} \mathbf{X}_\xi(k), \quad (5)$$

де  $N_\xi = N_{FFT} - n_s$  – кількість шумових відліків.

У подальшому значення  $L_\xi$  використовують для розрахунку порога для заданого значення ймовірності хибної тривоги  $P_{FI}$ .

### 3. Алгоритм аналізу частотних каналів

Рівень шуму в смузі частот аналізу через широкий динамічний діапазон сигналів і утворення п'єдесталу бічними пелюстками потужних сигналів може бути нерівномірним. У такому разі може виникати ситуація, коли кілька суміжних сигналів будуть виявлятися як один частотний канал, тому доцільно проводити додатковий аналіз для визначення деякого показника, що буде вказувати на заповненість каналу. Для цього будемо використовувати тестову статистику, яка є відношенням суми відліків СЦП в частотному каналі  $N_{ch}$  до добутку ширини каналу  $\Delta_{N_{ch}}$  на максимальний рівень потужності в ньому, відповідно до такого виразу:

$$TS = \frac{\sum_{k \in N_{ch}} \mathbf{P}_{xx}(k)}{\Delta_{N_{ch}} \max_{k \in N_{ch}}(\mathbf{P}_{xx}(k))}. \quad (6)$$

Порівняння значення даної статистики з порогом  $\gamma_{TS}$  дасть змогу прийняти рішення про необхідність додаткового порогового оброблення. Експериментальним шляхом було встановлено, що за поріг доцільно обрати значення 0,1. На рис. 3 наведено блок-схему алгоритму аналізу частотних каналів. Вхідними даними алгоритму (блок 1) є порогове значення тестової статистики  $\gamma_{TS}$  та вектор значень меж частотних каналів  $\mathbf{CH}$ . У блоці 2 розраховуються значення тестової статистики для кожного з частотних каналів та порівнюються з порогом. Якщо в усіх частотних каналах значення тестової статистики перевищує поріг, то здійснюється вихід з алгоритму. У протилежному разі обчислюється значення динамічного діапазону  $D$  у визначених каналах (блок 3). У блоках 4–6 розраховується довжина вікна ковзаючого середнього  $L$  у відліках залежно від ширини частотного каналу. У блоці 7 визначаються значення допоміжних величин MAX, MEAN, MIN для розрахунку порога в каналах відповідно до таких виразів:

$$\begin{aligned}
 MAX &= \max(MA(\mathbf{P}_{xx}(\mathbf{CH}), L)); \\
 MEAN &= \text{mean}(MA(\mathbf{P}_{xx}(\mathbf{CH}), L)); \\
 MIN &= \min(MA(\mathbf{P}_{xx}(\mathbf{CH}), L)),
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

де  $MA()$  – оператор розрахунку ковзаючого середнього.

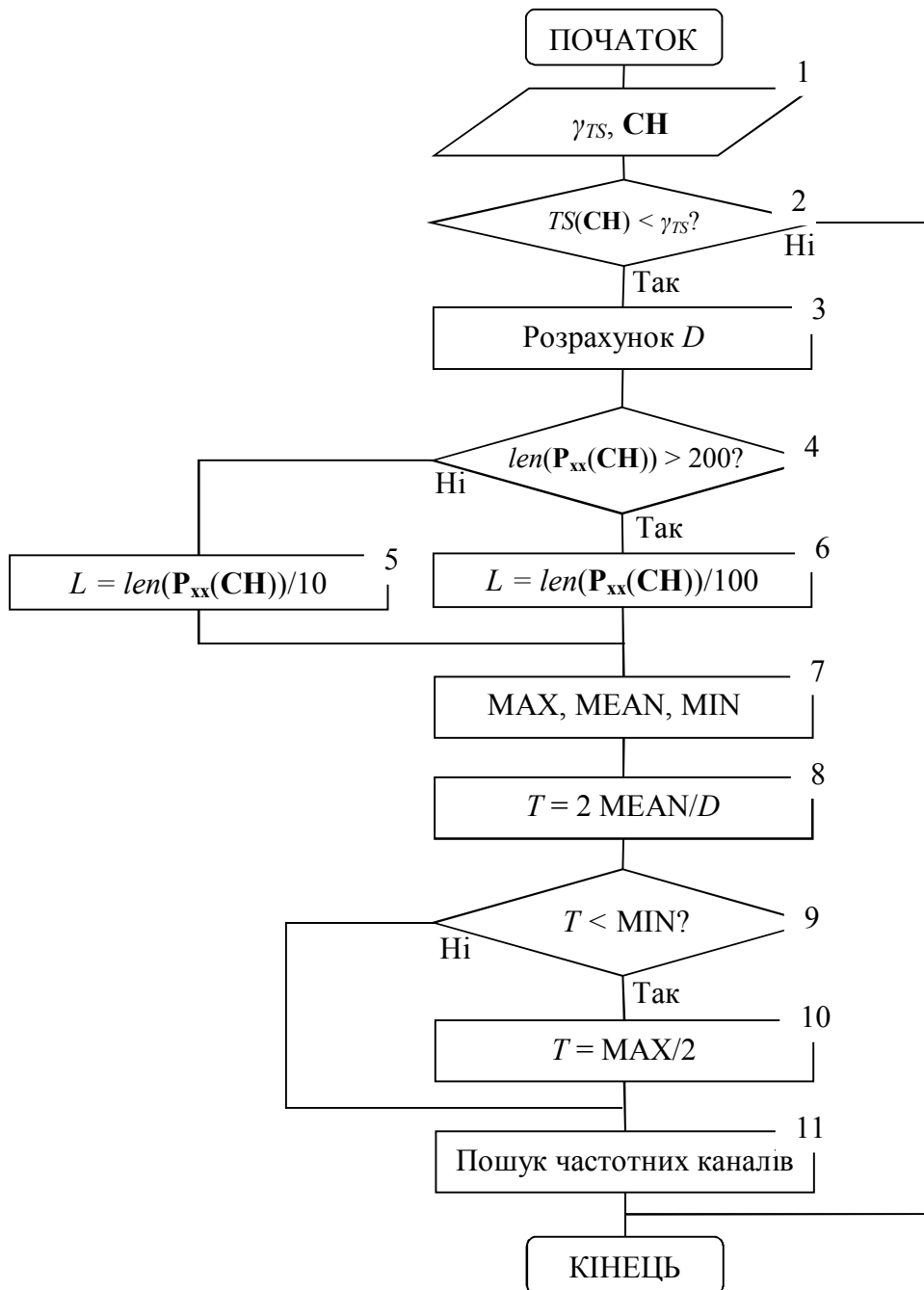


Рис. 3. Блок-схема алгоритму аналізу частотних каналів

У блоках 8–10 розраховується значення порога  $T$ , а в блоці 11 проводиться пошук частотних каналів із використанням цього порога для згладженої оцінки СЩП. Згладжування СЩП необхідне для зменшення її дисперсії.

Використання тестової статистики на заповненість частотного каналу дозволяє виявляти сигнали в умовах нерівномірного рівня шуму, що особливо актуально для

короткохвильового діапазону частот, а також у разі високої завантаженості та широкого динамічного діапазону сигналів, коли в потужного сигналу з'являється п'єдестал, що перевищує поріг.

#### 4. Приклади аналізу РЧС та рекомендації

Для дослідження запропонованих алгоритмів використовувалися записані за допомогою HackRF One комплексні сигнали з частотою дискретизації 20 МГц у діапазонах частот, де спостерігається найвища завантаженість: 88–108 МГц (FM), 900 МГц (GSM, LTE), 600–700 МГц (DVB-T), 1800 МГц (GSM, LTE), 2100 МГц (WCDMA). Зокрема, у смузі частот 942–962 МГц присутні сигнали з різною шириною та формою спектра, динамічний діапазон становить близько 35 дБ, а завантаженість – близько 80%.

Для формування вектора порогових значень тестової статистики використовувалися значення  $m_Q$  та  $\sigma_Q$  для таких значень параметрів періодограми Уелча:  $N_{FFT} = 512–16384$ ,  $K = 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30$ ,  $R = N_{FFT}/2$ , тип віконної функції – Хеммінга. Прямокутне вікно для аналізу РЧС в умовах апіорної невизначеності щодо динамічного діапазону сигналів через високий рівень бічних пелюсток і, як наслідок, маскування слабких сигналів застосовувати недоцільно. За  $K = 1$  на спектрі сигналу практично неможливо розрізнити частотні канали. Для їх надійного виявлення рекомендовано обирати значення  $K$ , що дорівнює 20–30.

У табл. 2 наведено значення кількості виявлених каналів, завантаженість смуги частот 942–962 МГц та кількість ітерацій алгоритму оброблення в частотній області (рис. 2) для різних значень  $N_{FFT}$  та  $K$  за  $P_{F1} = P_{F2} = 0,1$ . Селекція сигналів шляхом їх фільтрації за шириною спектра на рівні порога проводилася для мінімальної ширини спектра 200 кГц.

Із наведеної таблиці видно, що в разі збільшення  $K$  оцінка рівня завантаженості наближається до реальної, а кількість ітерацій алгоритму може як зростати, так і зменшуватися, що пов'язано зі структурою спектра для заданого  $N_{FFT}$ .

Для зменшення дисперсії оцінок СЦП за великих  $N_{FFT}$  можна провести її згладжування з використанням вікна ковзаючого середнього. Проте такий підхід призведе до завищення оцінки рівня шуму, крім того, він потребує додаткових обчислювальних ресурсів. Тому рекомендовано для виявлення частотних каналів використовувати значення  $N_{FFT}$  не більше 4096, що забезпечить такий самий результат, як і більше значення  $N_{FFT}$  із додатковим згладжуванням СЦП. При цьому останній варіант потребує більшої кількості відліків сигналу для аналізу. Збільшення необхідної кількості відліків дорівнює відношенню довжин ШПФ. Крім того, велика кількість виявлених частотних каналів за великих  $N_{FFT}$  потребує додаткових обчислень у разі селекції сигналів за шириною спектра.

Оцінка рівня шуму практично дорівнює його реальному значенню вже за  $K > 5$ . Значення  $P_{F1}$  практично не впливає на оцінку рівня шуму. За низьких рівнів завантаженості смуги частот (менше 50%) оцінка рівня шуму практично не залежить від  $P_{F2}$ , а за високих – стає завищеною в разі зменшення  $P_{F2}$ . Так, коли зменшується  $P_{F2}$  від 0,1 до  $10^{-5}$ , то зростання рівня шуму становить близько 2 дБ. Це пояснюється тим, що за таких умов деякі сигнальні відліки (особливо бічні пелюстки випромінювань) будуть віднесені до шумових, що призведе до завищення оцінки рівня шуму. Тому в умовах апіорної невизначеності щодо завантаженості ділянки РЧС рекомендовано обирати значення  $P_{F2}$  у межах 0,1–0,01, а шумові відліки відфільтровувати за шириною їх спектра.

Результати аналізу смуги частот 942–962 МГц

$N_{FFT}$	$K$	Без селекції сигналів			Фільтр 200 кГц	
		Кількість каналів	Кількість ітерацій	Завантаженість, %	Кількість каналів	Завантаженість, %
512	1	48	23	67	18	52
	5	27	15	79	13	71
	10	27	11	79	11	80
	30	16	11	88	12	85
1024	1	118	8	49	7	15
	5	50	19	79	14	73
	10	36	11	78	12	73
	30	25	20	87	12	84
4096	1	377	26	68	13	22
	5	178	18	74	10	56
	10	158	19	80	13	68
	30	116	15	85	10	74
16384	1	1742	6	43	3	4
	5	679	16	75	13	54
	10	557	20	79	12	61
	30	275	15	87	10	79

На рис. 4 наведено результати аналізу смуги частот 942–962 МГц для  $N_{FFT} = 4096$  та  $K = 30$ . Для розрахунку СЩП необхідно 63488 відліків сигналу загальною тривалістю 3,2 мс. Завантаженість смуги частот без селекції сигналів становить 85%. За відкидання частотних каналів, ширина смуги яких менше 200 кГц, завантаженість зменшується до 75%. Кількість виявлених каналів при цьому становить 10. Маємо такі значення тестової статистики для каналів: 0,212; 0,395; 0,337; 0,048; 0,166; 0,172; 0,3; 0,331; 0,267; 0,022. Тому відповідно до наведеного на рис. 3 алгоритму в 4-му ( $TS = 0,048$ ) та 10-му ( $TS = 0,022$ ) частотних каналах проводився додатковий аналіз та виявлялися підканали.

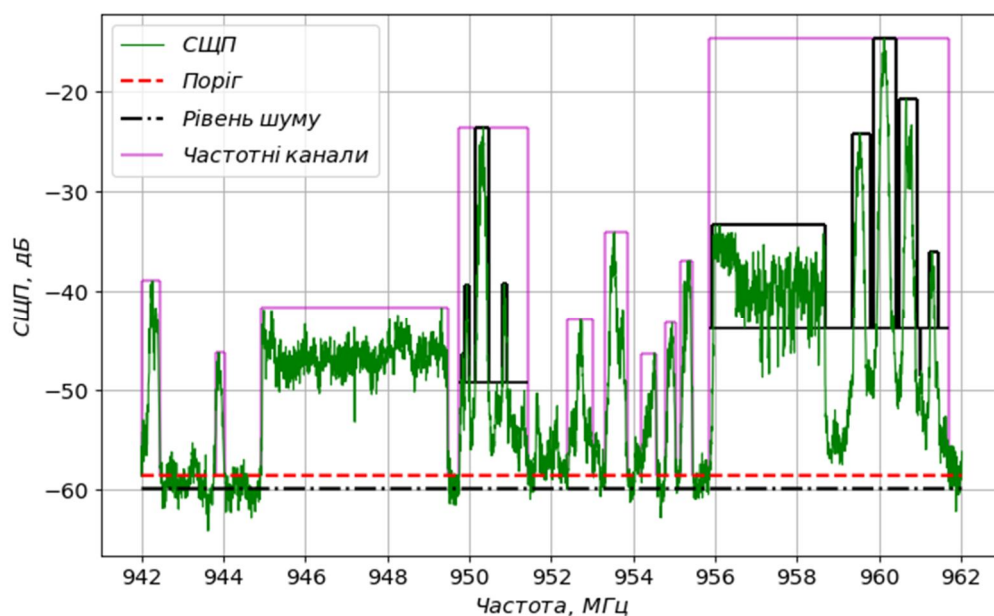


Рис. 4. Результати аналізу смуги частот 942–962 МГц

На рис. 5 наведено згладжену СЩП, нове значення порога та виділено частотні підканали в 4-му (а) й 10-му (б) каналах відповідно. Як бачимо, значення порога в кожному з каналів є різним.

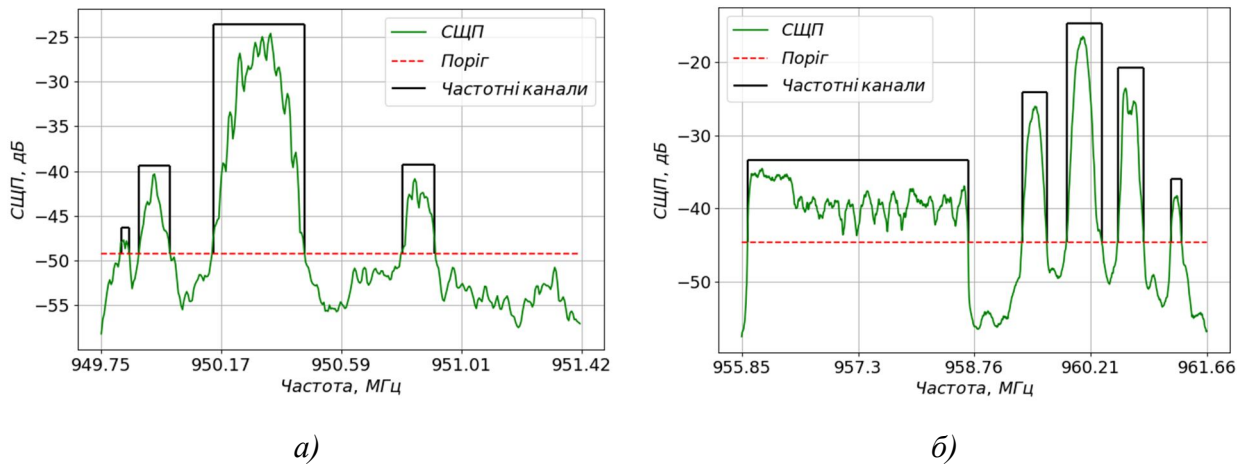


Рис. 5. Результати додаткового оброблення в 4-му (а) та 10-му (б) частотних каналах

Більші значення довжини ШПФ забезпечують краще розділення підканалів, проте потребують більших значень довжини вікна ковзаючого середнього.

**Висновки.** Наукова новизна запропонованого підходу до аналізу завантаженості РЧС полягає в автоматизації процесу оцінювання рівня шуму та селекції сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо РЕО шляхом динамічної зміни параметрів алгоритмів оброблення сигналів. Розроблені алгоритми можуть бути реалізовані в наявних та перспективних автоматичних системах радіомоніторингу для оцінювання завантаженості РЧС та селекції сигналів, оскільки не вимагають калібрування апаратури в разі коливань характеристик окремих елементів системи та зміни РЕО. Достовірність отриманих результатів підтверджується даними експериментальних досліджень ділянок РЧС із використанням запропонованих алгоритмів.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробленні автоматичних алгоритмів розпізнавання сигналів у частотних каналах.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Captain K. M., Joshi M. V. Spectrum Sensing for Cognitive Radio. Fundamentals and Applications. CRC Press. 2022. 256 p. <https://doi.org/10.1201/9781003088554>
2. Liang Y.-C. Dynamic Spectrum Management. From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence. Springer, 2020. 180 p.
3. Elmasry F. G. Dynamic Spectrum Access Decisions. Local, Distributed, Centralized, and Hybrid Designs. JohnWiley & Sons Ltd., 2021. 728 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119573784>
4. Arkwazee M., Ilyas M., Jasim A. D. Automatic Spectrum Sensing Techniques Using Support Vector Machine in Cognitive Radio Network // 2022 2nd Int. Conf. on Adv. in Elect., Com., Comm. and Sust. Techn. (ICAECT). Bhilai, India, 2022. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICAECT54875.2022.9807922>
5. Yakkati R. R., Tripathy R. K., Cenkeramaddi L. R. Radio Frequency Spectrum Sensing by Automatic Modulation Classification in Cognitive Radio System Using Multiscale Deep CNN // IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22, № 1. P. 926–938. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3128395>

6. Sun M., Zhao C., Yan S., Li B. A Novel Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks With Noise Uncertainty // In IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66, № 5. P. 4424–4429. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2596789>
7. Zheng Q., Wang H., Elhanashi A., Saponara S., Zhang D. An Intelligent Non-cooperative Spectrum Sensing Method Based on Convolutional Auto-encoder (CAE) // Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society. ApplePies 2021 : Lecture Notes in Electrical Engineering. 2022. Vol. 866. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95498-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95498-7_1)
8. Lin M., Zhang X., Tian Y., Huang Y. Multi-Signal Detection Framework: A Deep Learning Based Carrier Frequency and Bandwidth Estimation. Sensors, 2022. Vol. 22. P. 1–19. <https://doi.org/10.3390/s22103909>
9. Quan Z. et al. Optimal Multiband Joint Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 2009. Vol. 57, No. 3. P. 1128–1140. <http://dx.doi.org/10.1109/tsp.2008.2008540>
10. Бугайов М. В. Узагальнений енергетичний детектор з ітеративним обробленням вузькосмугових сигналів у частотній області // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. Київ : КПІ, 2019. № 78. С. 27–35. <https://doi.10.20535/RADAP.2019.78.27-35>
11. Бугайов М. В. Ітеративний метод виявлення радіосигналів на основі вирішуючих статистик // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. Київ : КПІ, 2020. № 81. С. 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.18.11-20>
12. Buhaiov M. V. Fast spectrum sensing method for cognitive radio // Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh., radioaparotobuduv. 2020. № 83. P. 41–46. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.41-46>
13. Buhaiov M. V. Iterative method for noise power estimating at unknown spectrum occupancy // Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh., radioaparotobuduv. 2022. № 88. P. 42–49. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.42-49>
14. Бугайов М. В., Нагорнюк О. А., Шапар Р. В. Огляд аналізаторів радіочастотного спектра та пропозиції щодо динамічної реалізації енергетичного детектора // Технічна інженерія. 2021. № 2 (88), 95–102. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-95-102](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-95-102)
15. Buhaiov M. V., Kliazyuka V. V., Kozyura I. V., Zavorodnii D. S. Method for spectrum holes detection based on mode analysis of spectral samples histogram // Radioelectronic and Computer Systems. 2022. № 4 (104). P. 108–116. <https://doi.org/10.32620/reks.2022.4.08>
16. Бугайов М. В. Метод визначення частотно-часових меж зайнятих ділянок радіочастотного спектра // XVI міжнар. наук.-техн. конф. «Перспективи телекомунікацій», (11–15 квітня 2022 р.). Київ : НТУУ КПІ, 2022. С. 109–111.
17. Buhaiov M. V. Threshold values of the coefficient of variation in iterative spectrum sensing algorithms // IEEE UkrMiCo-2021: International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, November 29 – December 3, 2021. P. 241–244. <https://doi.10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716616>
18. Zar J. H. Approximations for the Percentage Points of the Chi-Squared Distribution // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1978. Vol. 27, No. 3. P. 280–290. <http://dx.doi.org/10.2307/2347163>

Стаття надійшла до редакції 14.04.2023.



REFERENCES

1. Captain, K. M., & Joshi M. V. (2022). *Spectrum Sensing for Cognitive Radio. Fundamentals and Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003088554>
2. Liang, Y.-C. (2020). *Dynamic Spectrum Management. From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Springer.
3. Elmasry, F. G. (2021). *Dynamic Spectrum Access Decisions. Local, Distributed, Centralized, and Hybrid Designs*. JohnWiley & Sons Ltd. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119573784>
4. Arkwazee, M., Ilyas, M., & Jasim, A. D. (2022). Automatic Spectrum Sensing Techniques Using Support Vector Machine In Cognitive Radio Network. In *2nd Int. Conf. on Adv. in Elect., Com., Comm. and Sust. Techn. (ICAECT-2022)*. Bhilai, India. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ICAECT54875.2022.9807922>
5. Yakkati, R. R., Tripathy, R. K., & Cenkeramaddi, L. R. (2022). Radio Frequency Spectrum Sensing by Automatic Modulation Classification in Cognitive Radio System Using Multiscale Deep CNN. *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, № 1, 926–938. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3128395>
6. Sun, M., Zhao, C., Yan, S., & Li, B. (2017). A Novel Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks With Noise Uncertainty. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, № 5, 4424–4429. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2596789>
7. Zheng, Q., Wang, H., Elhanashi, A., Saponara, S., & Zhang, D. (2022). An Intelligent Non-cooperative Spectrum Sensing Method Based on Convolutional Auto-encoder (CAE). In: Saponara, S., De Gloria, A. (eds) *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society. ApplePies 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 866. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95498-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95498-7_1)
8. Lin M., Zhang X., Tian Y., & Huang Y. (2022). Multi-Signal Detection Framework: A Deep Learning Based Carrier Frequency and Bandwidth Estimation. *Sensors*, vol. 22, 1–19. <https://doi.org/10.3390/s22103909>
9. Quan, Z. et al. (2009). Optimal Multiband Joint Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, No. 3, 1128-1140. <http://dx.doi.org/10.1109/tsp.2008.2008540>
10. Buhaiov, M. V. (2019). Uzahalnenyi enerhetychnyi detektor z iteratyvnyim obroblenniam vuzkosmuhovykh syhnaliv u chastotnii oblasti [Generalized energy detector with iterative processing of narrowband signals in frequency domain]. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 78, 27–35. <https://doi.10.20535/RADAP.2019.78.27-35> [in Ukrainian].
11. Buhaiov, M. V. (2020). Iteratyvnyi metod vyivlennia radiosyhnaliv na osnovi vyrishuiuchykh statystyk [Iterative method of radiosignals detection based on decision statistics]. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 81, 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.18.11-20> [in Ukrainian].
12. Buhaiov, M. V. (2020). Fast spectrum sensing method for cognitive radio. *Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 83, 41–46. <https://doi.10.20535/RADAP.2020.83.41-46>
13. Buhaiov, M. V. (2022). Iterative method for noise power estimating at unknown spectrum occupancy. *Visnik NTUU KPI. Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv*, № 88, 42–49. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.88.42-49>
14. Buhaiov, M. V., Nahorniuk, O. A., & Shapar, R. V. (2021). Ohliad analizatoriv radiochastotnoho spektra ta propozytsii shchodo dynamichnoi realizatsii enerhetychnoho

detektora [Review of radio frequency spectrum analyzers and proposals for dynamic implementation of energy detector]. *Technical Engineering*, № 2 (88), 95–102. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-95-102](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-95-102) [in Ukrainian].

15. Buhaiov, M. V., Kliazyuka, V. V., Kozyura, I. V., & Zavhorodnii, D. S. (2022). Method for spectrum holes detection based on mode analysis of spectral samples histogram. *Radioelectronic and Computer Systems*, № 4 (104), 108–116. <https://doi.10.32620/reks.2022.4.08>

16. Buhaiov, M. V. (2022). Metod vyznachennia chastotno-chasovykh mezh zainiatykh dilianok radiochastotnoho spektra [Method for determining occupied time-frequency spectrum regions]. In *XVI Intern. Sc. Conf. "Modern challenges in telecommunications"*. Kyiv, April 11–15, 2022. (pp. 109–111). Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].

17. Buhaiov, M. V. (2022). Threshold values of the coefficient of variation in iterative spectrum sensing algorithms. In *IEEE UkrMiCo-2021: International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, November 29 – December 3. (pp. 241–244). <https://doi.10.1109/UkrMiCo52950.2021.9716616>

18. Zar J. H. (1978). Approximations for the Percentage Points of the Chi-Squared Distribution. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol. 27, No. 3, 280–290. <http://dx.doi.org/10.2307/2347163>

**M. V. Buhaiov, S. V. Zakirov, V. V. Kliazyuka, D. O. Honcharov**

#### **AUTOMATIC SPECTRUM SENSING AND SIGNAL SELECTION**

*Constant increasing of radio-electronic devices number leads to an increase of spectrum occupancy and complication of radio-electronic environment. In such conditions, it is necessary to use automatic algorithms for prompt detection and selection of radio signals in radio monitoring systems. The purpose of the article is to develop algorithms and recommendations for their practical implementation to automate the process of radio frequency spectrum occupancy analysis and signal selection in a wide dynamic range with high occupancy of analyzed frequency band in conditions of a priori uncertainty of noise level. To achieve the stated goal were developed generalized algorithm for radio frequency spectrum analysis, algorithm of frequency domain processing and algorithm for frequency channels analysis. Examples of spectrum bands analysis with high occupancy and recommendations for developed algorithms implementation were represented. Depending on variability of noise power in analyzed frequency band an adaptive change of estimation time interval is provided, which will reduce the computational complexity. In conditions of no uniform noise level or a wide dynamic range of signals, it is proposed to use special test statistics to determine fullness of analyzed frequency channels. In the course of experimental studies, the analysis of recordings in frequency bands of 900 MHz, 1800 MHz and 2100 MHz was carried out. It was established that the developed algorithms provide a correct estimation of radio frequency spectrum occupancy and selection of signals with a dynamic range of at least 35 dB and occupancy of up to 92%. Developed algorithms do not require calibration of the equipment in case of fluctuations in characteristics of separate system elements and changes in radio-electronic environment and can be implemented in existing and perspective automatic radio monitoring systems.*

**Keywords:** radio frequency spectrum; spectrum occupancy; signal selection; test statistics; frequency channel.

І. А. Пількевич, С. І. Мірошніченко

**МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ  
ТЕРИТОРІАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНИХ ПІДРОЗДІЛІВ ОРГАНІЗАЦІЇ**

*Для створення ефективних механізмів взаємодії окремих підрозділів організації (підприємства, установи) на сьогодні використовується інформатизація всіх процесів, які мають місце в її повсякденній діяльності. Інтенсивний розвиток інформаційних систем створює умови для розробки та впровадження сучасних інформаційних засобів, що дозволяють автоматизувати і тим самим більш ефективно реалізовувати процеси управління. Разом зі зростаючою складністю інформаційних систем і використовуваних у них інформаційних технологій збільшується обсяг вимог до них.*

*Одним із напрямків реалізації інформаційних систем у сучасних умовах є системи електронного документообігу, які забезпечують обмін даними між окремими підрозділами, швидке доведення конкретних документів до визначених посадових осіб, а також інформаційно-аналітичну діяльність всієї організації.*

*Основну роль у забезпеченні діяльності інформаційних систем відіграють бази даних, які є способом отримання необхідної інформації. Накопичення інформації щодо різних видів діяльності організації відбувається в автоматизованих системах управління, які повинні забезпечувати роботу її окремих підрозділів.*

*У статті описано функціонування запропонованої системи електронного документообігу, надано алгоритм роботи моделі інформаційної системи, а також функціональну схему системи електронного документообігу окремої організації. Детально розглянуто сутність бази даних та схему її зв'язків за допомогою діаграми «Сутність – зв'язок» (ER-діаграми), а також наведено приклад головної форми програми та інформаційну сторінку визначеного користувача.*

*Запропонована інформаційна система може бути реалізована за допомогою системи керування базами даних MySQL, а практичне її використання буде безкоштовним.*

**Ключові слова:** електронний документообіг; база даних; модель інформаційної системи; автоматизована система управління.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Передача інформації між територіально розподіленими підрозділами окремої організації (установи, підприємства) набуває сьогодні особливої актуальності. Важливим кроком у цьому напрямі стало започаткування 18 квітня 2002 року довгострокової програми під умовною назвою “Електронна Україна” [1]. Не менш значущим також є захист даних, які містять у собі конфіденційну (закриту) інформацію, від третіх осіб. Наявні системи в цій сфері є застарілими, вони не в повному обсязі забезпечують автоматизовану передачу інформації в комп’ютерних системах, крім того, вони складні у використанні [2].

В органах управління циркулюють значні інформаційні потоки. Одним із найбільш важливих процесів, які необхідно автоматизувати, є доведення документів до виконавців, саме тому більшість розробок на даний момент здійснюється в цьому напрямку.

© І. А. Пількевич, С. І. Мірошніченко, 2023

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [3] розглянуто моделі організації електронного документообігу, які дозволяють ефективно їх впроваджувати, а також сформульовано вимоги до їх функціональних можливостей. У роботі детально розглянуто загальні принципи організації документообігу в різних структурах, однак не наведено приклади його практичної реалізації.

Автори [4] проаналізували загрози інформаційній безпеці систем електронного документообігу, які використовуються в державних та комерційних структурах, і запропонували шляхи їх подолання. У цій роботі обґрунтовано, що впровадження заходів інформаційної безпеки в системах електронного документообігу сприятиме покращенню ефективності прийняття управлінських рішень, прозорості в діяльності організації, підвищенню рівня безпеки та збереженню інформації. Основні наукові положення статті можна використовувати в документаційній діяльності будь-якого суб'єкта господарювання. Однак і в цій публікації автори обмежилися лише теоретичними викладками матеріалу, що розглядається.

У [5] досліджено організаційно-методичні аспекти електронного документообігу та визначено переваги системи електронного документообігу на підприємстві, а саме: економія часу, підвищення прозорості внутрішньої роботи, більше гнучкості щодо фізичного місцезнаходження співробітників, підвищення безпеки інформації та документів, більш адекватне використання фізичного простору і техніки, ведення історії кожного файлу та супутньої документації, підвищення рівня задоволеності працівників і керівників, зменшення витрат на друк, поштові марки, конверти та пересилання. У роботі зазначено, що використання систем електронного документообігу дасть можливість організації оптимізувати його документообіг та скоротити витрати як часу, так і матеріальних ресурсів на забезпечення процесу документообігу організації в цілому. Загалом слід зауважити про не лише корпоративний ефект, а й економічну результативність системи електронного документообігу.

У статті [6] визначено формальну модель керованого проектування документообігу в управлінських інформаційних системах. Запропоновано нові принципи моделювання задач керування технологічним процесом проектування, контролю та корекції плану робіт зі створення управлінських інформаційних систем, а також рекомендовано новий метод і відповідну технологію керованого проектування документообігу в інформаційних системах із необхідним визначенням інформаційних характеристик документів і моделювання їх на основі теорії масового обслуговування щодо проходження маршрутів документами в системі та оцінювання кількісних показників їх потоків. Результати досліджень покладено в розробку конкретних систем, які функціонують протягом останніх років у Головному управлінні державної служби України та Міністерстві освіти і науки України.

У роботі [7] автори проаналізували системи електронного документообігу та їхню організацію, сформулювали основні вимоги до них й визначили їх пріоритетні завдання. Крім того, сформулювали загальні принципи побудови та функціонування інтегрованої системи електронного документообігу та перешкоди, які виникають у процесі її встановлення; перерахували також можливості, які надає автоматизація документообігу. У статті зроблено висновок, що на даний час актуалізувалася необхідність створення єдиної інтегрованої системи документообігу, яку не можливо запровадити відразу, оскільки цей процес повинен пройти низку етапів. У разі створення розподіленої системи

документообігу повинен бути сервер установи, який забезпечить роботу корпоративної мережі. За зразок можна взяти одну з розроблених інтегрованих систем документообігу, якій у ході вибору спільної платформи для подання інформації доцільно орієнтуватися на технології, пов'язані з мовою XML. Основною проблемою, яка значно знижує ефективність автоматизації облікових процесів, є проблема узгодження форматів подання даних. Тому пошук прийняттого формату є принциповим для побудови великих (масштабу установи) інформаційних систем.

Варто зазначити, що багато популярних інтернет-джерел звертають увагу на велику перспективу розвитку технології електронного документообігу, зокрема й у військовій сфері. Деякі з них зазначають, що технологія має багато можливостей у захисті інформаційних систем із обмеженим (закритим) доступом.

**Формулювання завдання дослідження.** Як відомо [8], сучасні тенденції розвитку суспільства для своєчасного прийняття обґрунтованого рішення у різних сферах діяльності зумовлюють необхідність доступу користувачів до інформації, яка постійно оновлюється. Це вимагає від розробників створення таких програмних продуктів, доступ до яких був би, по-перше розподілений за тематикою, по-друге, користувач мав би доступ до тієї інформації, яка призначена лише для нього, та, по-третє, він застосував би засоби підтвердження її отримання.

Одним із способів накопичення та зберігання такої інформації є бази даних (БД), що створюються в різних галузях. Інформація, яка знаходиться в таблицях БД, може бути також розподілена за різними видами діяльності, можливим є створення таблиць, які відповідають за диференційований доступ користувачів (паролі або електронні ключі).

Накопичення інформації щодо функціонування організації передбачає створення інформаційних комплексів, які узагальнюватимуть її роботу та можуть бути використані в схожих структурах, що працюють за однаковими стандартами.

Одним із таких інформаційних комплексів є автоматизована система управління (АСУ), яка забезпечує роботу різних підрозділів організації в одній БД. Наприклад, АСУ закладу вищої освіти (ЗВО) повинна мати у своєму складі таблиці штатного розпису, науковців, відповідальних за матеріальні цінності, викладачів ЗВО тощо. Кожен користувач БД із відповідним допуском до неї має можливість доступу до інформації.

Отже, АСУ ЗВО розбивається на декілька складових. Головною частиною є створення штатного розпису закладу, до якого потім приєднуються інші компоненти (складання розкладу, наукова діяльність, робота підрозділів тощо). Одним із важливих елементів роботи АСУ є автоматизований документообіг, який дозволяє користувачам ознайомлюватися з документами, занесеними до БД, із підключенням до АСУ ЗВО без витрати значного часу на переміщення територією, а система обліку користувачів із присвоєнням їм персонального коду дозволяє ставити визначеним особам відмітку про ознайомлення з окремим документом, який їм відписаний для відпрацювання. Завданням статті є створення моделі інформаційної системи (ІС) обліку та контролю відпрацювання документів, яка є підсистемою АСУ ЗВО.

**Виклад основного матеріалу.** Експлуатація моделі ІС забезпечується технічними, програмними, організаційними засобами. Технічно БД електронних документів встановлюються на її сервер. На окремих ПЕОМ користувачів різної архітектури,

розміщених у різних підрозділах, є клієнтські додатки для підключення до БД, а також роботи з документами. ІС може використовувати внутрішню (локальну) мережу підрозділів без виходу в Інтернет.

Програмно для забезпечення роботи моделі ІС документообігу за основу БД взято таблиці вільної системи керування БД MySQL. Вебпрограмування здійснюється за допомогою розповсюдженої мови загального призначення з відкритим кодом PHP. На фізичному рівні проектування БД основною її таблицею є “Документи”, яка містить джерело надходження, назву, номер, тип документа, коротку анотацію, посилання на нього. З нею за ключовим полем з’єднується таблиця з особистими даними користувачів та наданими їм електронними кодами (ключами). В АСУ ЗВО таблиця користувачів приєднується до таблиці посад штатного розпису. Під час обробки документа ми маємо можливість направити його до потрібних посадових осіб для відпрацювання, про що вони підтверджують своїм електронним кодом, автоматично вказується дата та час отримання документа для подальшого контролю. Усі документи зберігаються на сервері. Відповідальна особа (яка завантажує документи до БД) має можливість контролювати рух, час відпрацювання документа, затримки, які при цьому виникли. Також вона може надати дозвіл на скачування документа або лише на ознайомлення з ним.

Виведення документів, які знаходяться на відпрацюванні, не відпрацьовані своєчасно, вже відпрацьовані та за якими здійснюється контроль, відбувається за допомогою критеріїв пошуку та створення звітів.

Робота моделі ІС організована на рівні інструкцій та правил, встановлених у кожній частині для роботи з нею, виходячи з обмежень у функціонуванні закладу.

Алгоритм роботи, програмне та технічне забезпечення ланок виконавців, якісне організаційне забезпечення моделі ІС можуть значно покращити систему контролю відпрацювання документів, скоротити час на доведення інформації до відповідальних виконавців і доповіді начальникові про рух й обробку документів, своєчасність відпрацювання та затримки в роботі для подальшого прийняття рішення.

Аналіз структури інформаційних потоків моделі ІС електронного документообігу дозволяє створити DFD-діаграму (діаграму потоків даних) (рис. 1).

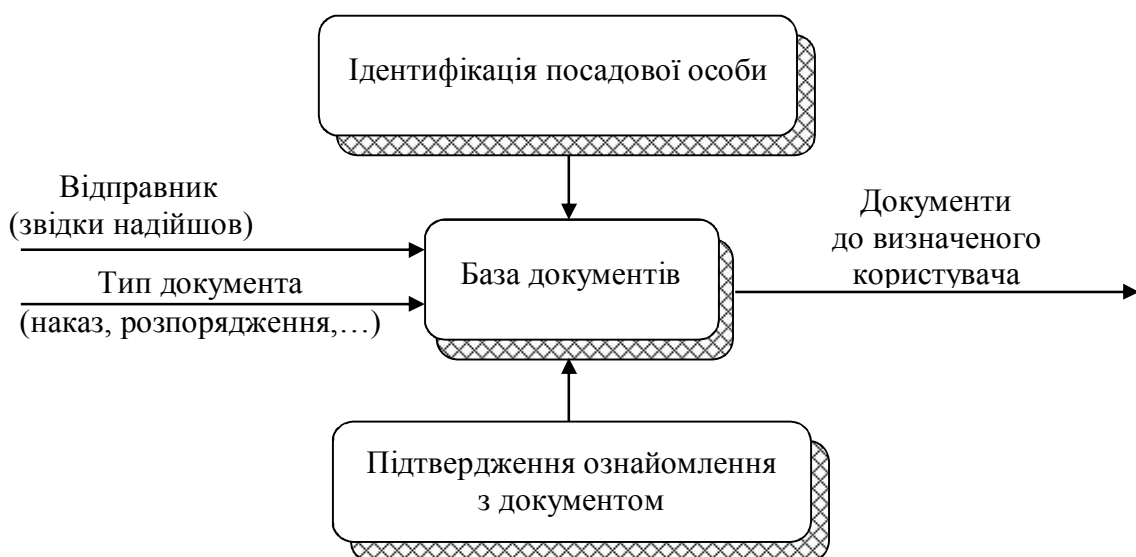


Рис. 1. DFD-діаграма моделі ІС

Розширену DFD-діаграму, яка дозволяє побачити зв'язки між різними блоками моделі ІС, наведено на рис. 2.

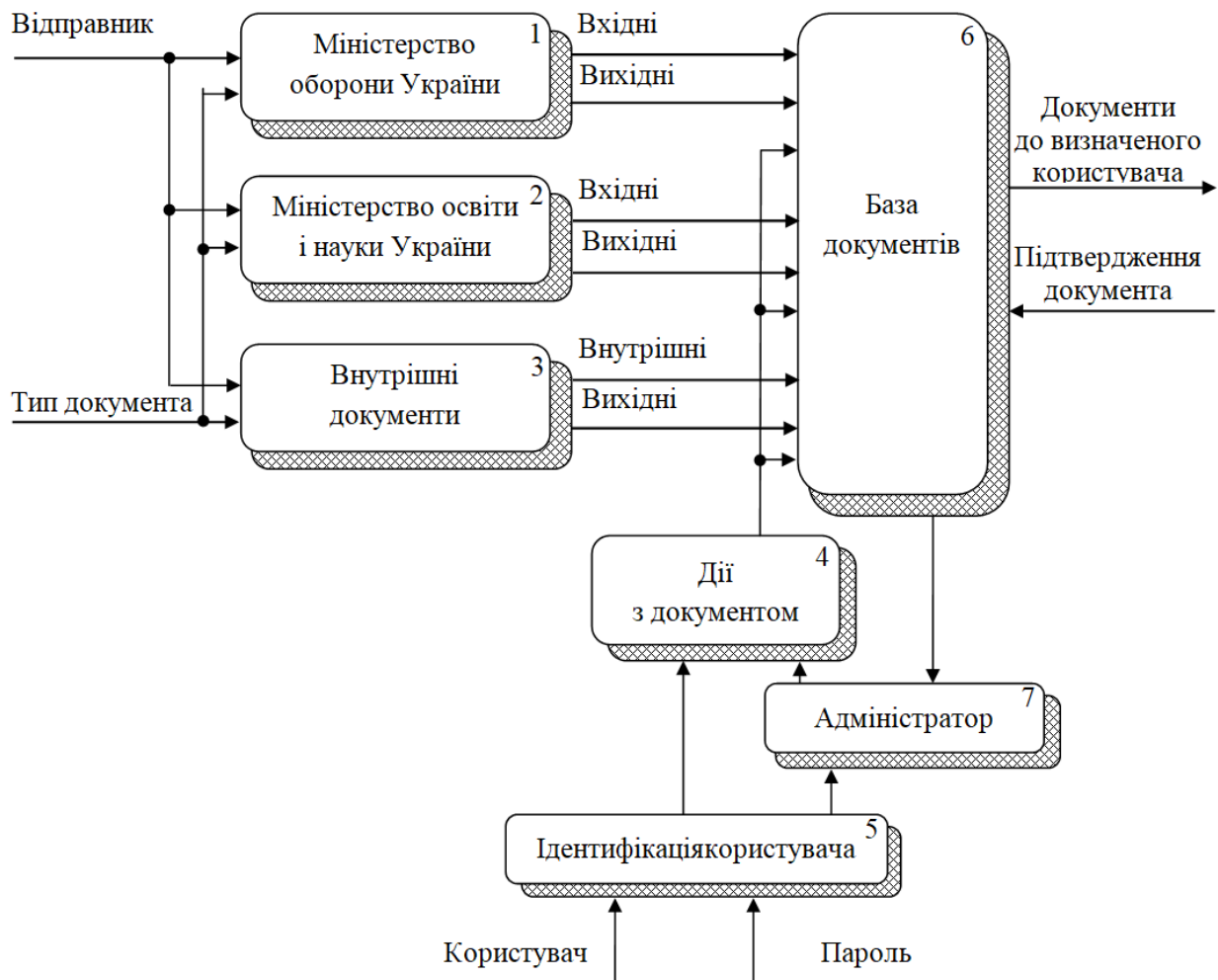


Рис. 2. Розширена DFD-діаграма моделі ІС

Вхідними даними для адміністратора системи є тип документа (наказ, розпорядження, рішення, постанова, оперативне завдання тощо) та його адресант (від кого надійшов). Приймавши документ, адміністратор мережі доповідає керівництву та за наказом зберігає документ на сервері, далі він розсилає посилання на нього до визначених користувачів (причому це повинно здійснюватися в автоматичному режимі: одному, групі за штатним розписом або окремим посадовим особам) із вказівкою щодо дати доповіді про відпрацювання. Користувачі, отримуючи документ на клієнтські ПК, повинні підтвердити отримання доступу до нього.

#### Опис роботи системи електронного документообігу

На основі отриманої інформації можемо побудувати алгоритм роботи моделі ІС (рис. 3).

Функціональну схему роботи системи електронного документообігу наведено на рис. 4. Відповідно до неї функції моделі ІС поділяються за такими напрямками: після визначення користувача системи здійснюється або введення інформації (режим адміністратора), або її пошук і робота з визначеним документом (режим користувача).

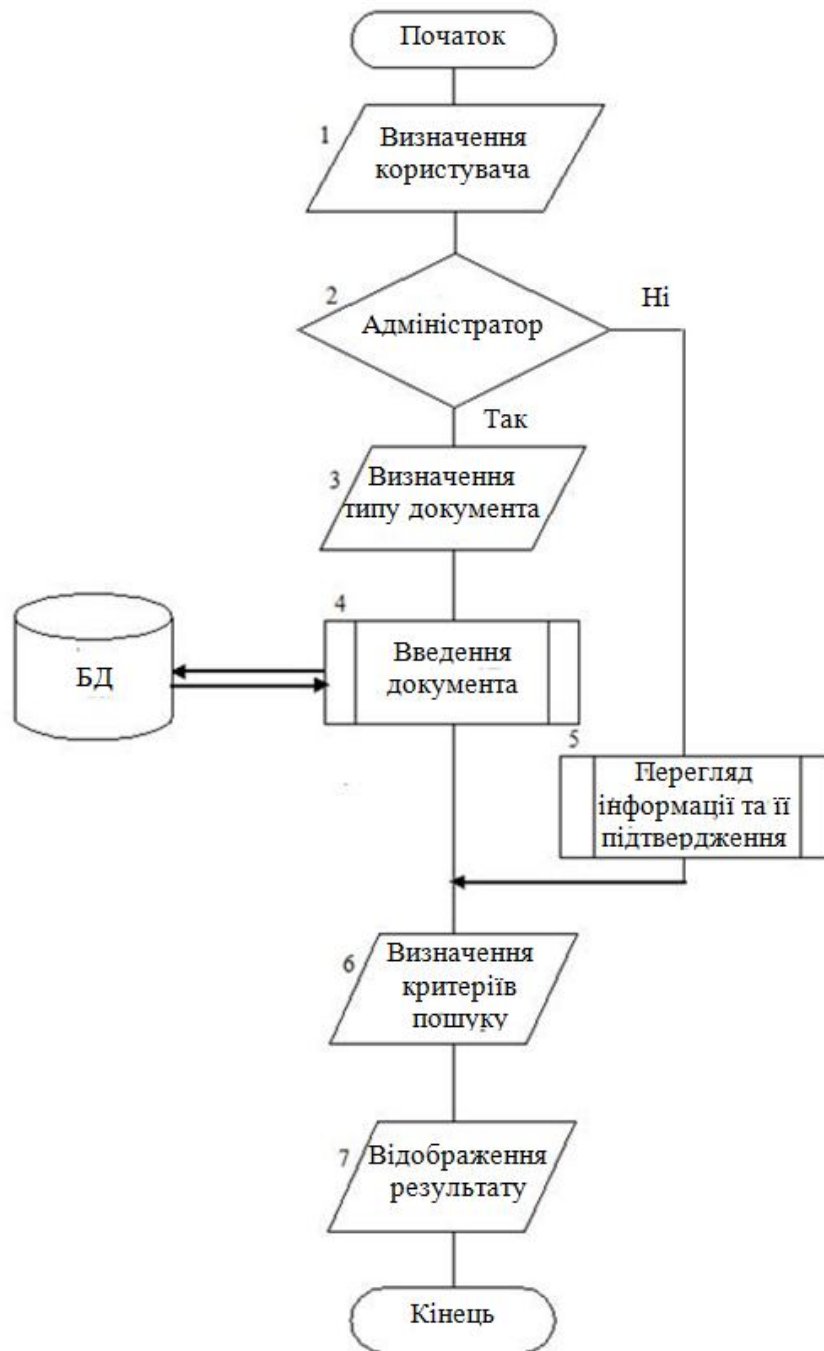


Рис. 3. Алгоритм роботи моделі ІС

Отже, БД документообігу, як складова АСУ, може містити в собі такі таблиці:

«Штат», де перерахований загальний штат підрозділу та визначені ключі підтвердження роботи з документом (поле електронного підпису – певний набір цифр та символів для ідентифікації особи);

«Група» може відображати ділення штату на певні категорії (заступники, начальники служб, науковий склад тощо);

«Відправники» містить перелік джерел видачі документа;

«Документ» має у своєму складі такі поля: номер, назва, дата документа; час, коли він надійшов; короткий зміст та посилання на місце його зберігання, а також з'єднання з іншими таблицями реляційної БД;



«Тип документа» вказує на його різновид (наказ, звіт, розпорядження, рішення, постанова тощо).

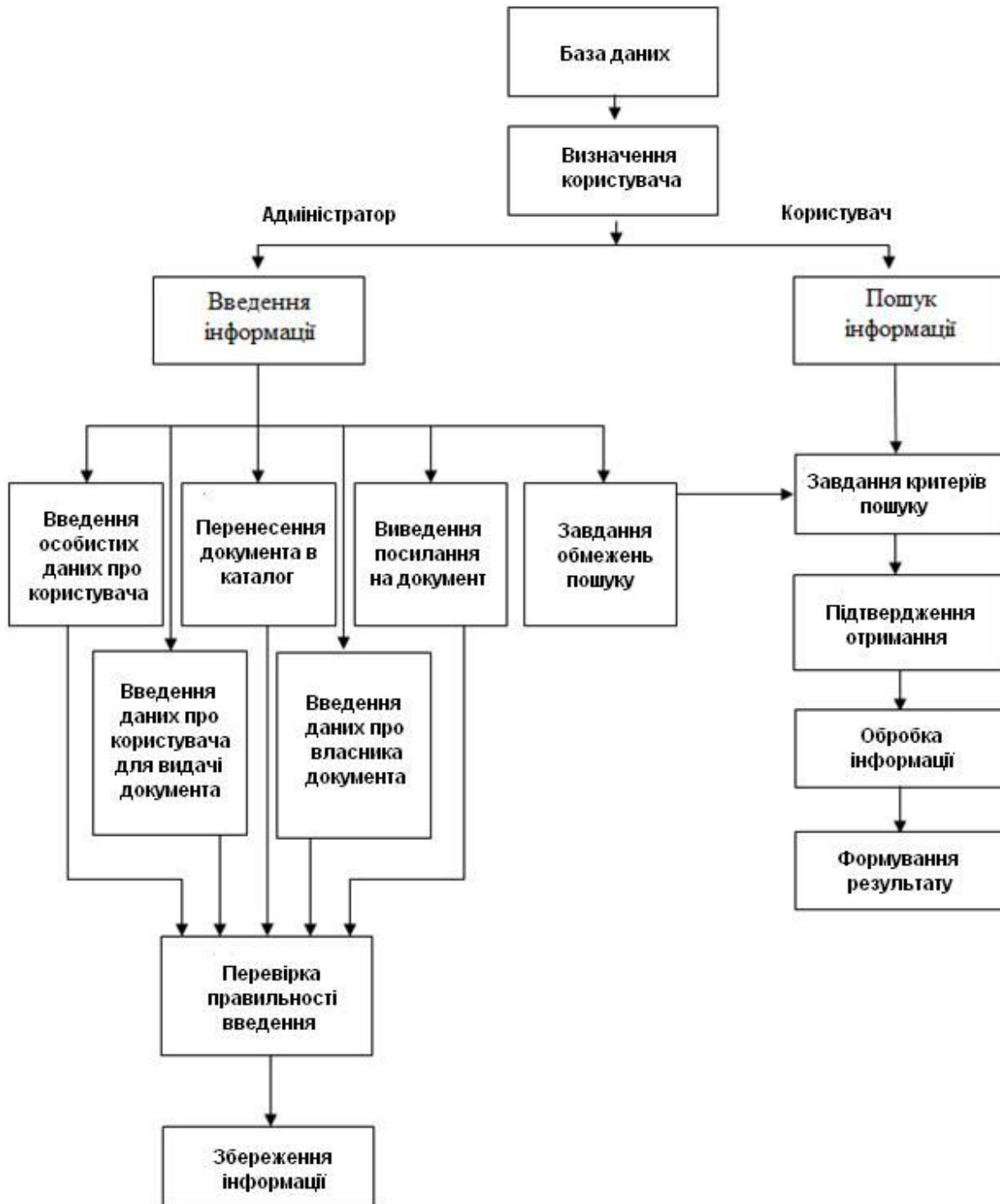


Рис. 4. Функціональна схема роботи моделі ІС

БД є реляційною, тобто таблиці з даними мають бути поєднані між собою. Модель ER («Сутність – зв’язок») графічно показує відношення між таблицями та може мати такий вигляд (рис. 5), де відношення (зв’язки) зображені лініями, що з’єднують ці таблиці (сутності). Ступінь зв’язку передається за допомогою символу «пташина лапка», що вказує на участь багатьох (N) екземплярів сутності, і одинарною горизонтальною рисою, яка свідчить про те, що у зв’язку задіяний один екземпляр сутності.

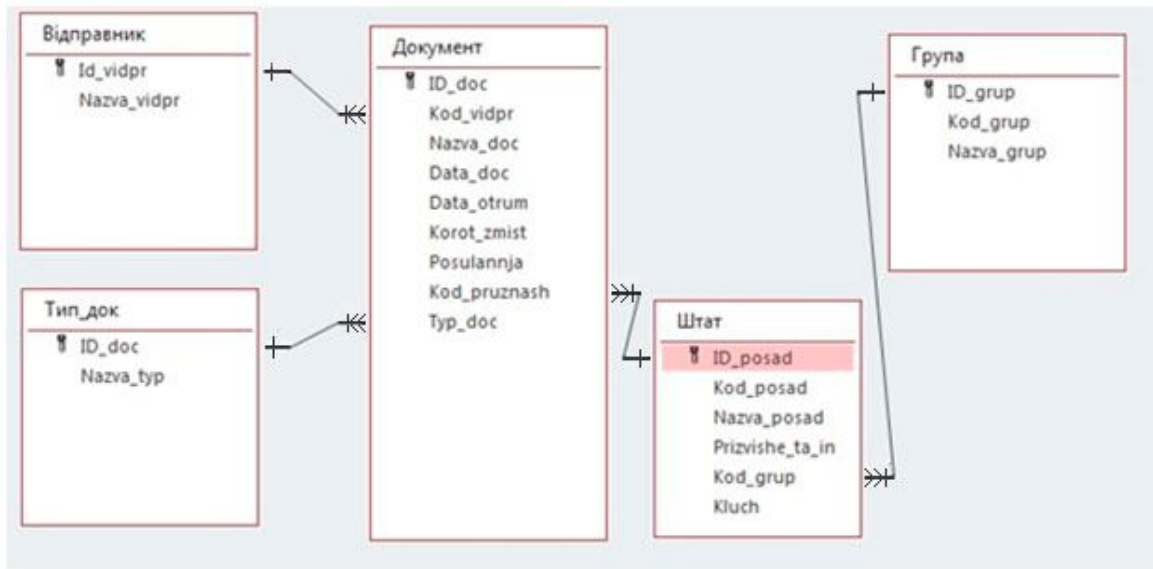


Рис. 5. ER-діаграма запропонованої моделі БД

Оскільки запропонована БД використовується за мережевою технологією, для її розробки можливе застосування системи керування БД MySQL. Обсяг документів у підрозділі дозволяє використовувати цю систему керування БД, крім того, вона є безкоштовною.

Можливий зовнішній вигляд головної форми програми наведено на рис. 6.

The screenshot shows the main interface of the program. At the top, there is a banner with the Ukrainian flag and the text "Україна" and "Інформаційна система ведення електронного документообігу". Below the banner, there is a registration section on the left and a main content area on the right.

**Реєстрація**

Ведіть ім'я  
  
 Ведіть пароль

**Загальний вигляд інформаційної системи**

Даний модуль призначений для ведення електронного журналу документів, які надходять до військової частини та відправляються з військової частини. Він дає змогу вести облік та контроль даних документів.

Для роботи з даною системою введіть зарезервоване ім'я та пароль.

Ви зареєстровані як загальний користувач.

Рис. 6. Головна форма програми

Адміністратор програми має можливість завантажувати необхідні документи в модель ІС, надавати права доступу до них конкретним посадовим особам та виконавцям (за рішенням командування / керівництва), а також відслідковувати процес відпрацювання завдання згідно з окресленими термінами, у такий спосіб здійснювати облік, моніторинг, корегування та контроль роботи визначеного працівника, що в цілому позитивно впливає на ефективність функціонування закладу (організації, підприємства, установи тощо). Зразок можливого застосування форми роботи адміністратора програми наведено на рис. 7.

Рис. 7. Додавання документа в ІС

Визначений користувач має можливість переглянути або завантажити документ із сервера для подальшої роботи (рис. 8).

Інформаційна система ведення електронного документообігу						
Укази Президента						
Номер документа	Реєстраційний документа	Дата створення	Дата надходження	Короткий зміст	Файл, що прикріпленний	
444444		2010 - 01 - 08	2010 - 01 - 04	Про організацію...		
11111		2011 - 02 - 08	2011 - 01 - 04	Про застосування...	<a href="#">Документ</a>	
A23-98		2010 - 02 - 08	2010 - 01 - 06	Про реорганізацію...		
ФФФ 0898		2010 - 06 - 04	2010 - 06 - 01	Про застосування...	<a href="#">Документ</a>	
A23-98	666/66567	2010 - 02 - 08	2010 - 01 - 06	Наказ МОН «...»	<a href="#">Документ</a>	
ВІ6454	77/345	2010 - 07 - 09	2010 - 06 - 06	Про майно...	<a href="#">Документ</a>	

Рис. 8. Інформаційна сторінка визначеного користувача

**Висновки.** Основною умовою для створення ефективних механізмів взаємодії територіально розподілених підрозділів організації є інформатизація всіх процесів, які мають місце в її повсякденній діяльності. Одним із напрямів реалізації цього завдання є впровадження систем електронного документообігу. Їх ефективне функціонування можливе лише на основі визначення: раціональної структури управління; видів діяльності та завдань, які необхідно виконати; взаємопідпорядкованості та взаємозалежності зайнятих в організації працівників; розстановки виконавців на окремих ділянках роботи відповідно до їх кваліфікації, спеціалізації. Склад та порядок розміщення обов'язкових реквізитів електронних документів визначається Законом України «Про електронні документи та електронний документообіг» [9].

Електронний документ може бути створений, переданий, збережений і перетворений електронними засобами у візуальну форму, яка відображає дані, що він містить, придатну для сприйняття його змісту людиною.

Оскільки безпечний обмін даними є критичним питанням у сучасних умовах розвитку України в цілому та в підсистемах сучасних організацій зокрема, то під час нього повинні вживатися такі заходи, за яких передача даних із кожного робочого місця системи не доступна третім особам. Запропоновано вхід із робочих місць у програму за допомогою наданих імен та паролів у сфері електронного обміну даними. Підтвердження доступу до документа забезпечується використанням електронно-цифрового підпису, який ідентифікує користувача та надає змогу контролювати час роботи з ним. Розміщення документів на сервері унеможливорює видалення, корегування та забезпечує неможливість зміни в процесі роботи з ними.

Особливість електронно-цифрового підпису полягає в тому, що він ґрунтується на алгоритмах криптографічного захисту інформації. Спеціальний код унеможливорює його підробку, але дозволяє перевірити доступ до роботи з документом визначеного працівника.

### **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Про Національну програму інформатизації : Закон України 2807-IX від 01.12.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2807-20#Text> (дата звернення: 20.05.2023).
2. Левченко А. О., Трутнев С. Г., Ісмаїлова Н. П., Шарипова І. В. Програмна реалізація підсистем обміну даними експертів у розподілених комплексах імітаційного моделювання бойових дій // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2022. Вип. 23. С. 4–13. <http://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22.01>
3. Матвієнко О. В., Цивін М. Н. Основи організації електронного документообігу : навч. посіб. Київ, 2008. 112 с.
4. Піддубна Л. В., Павліченко В. М. Інформаційна безпека в системах електронного документообігу // Науковий вісник Полтавськ. ун-ту економіки і торгівлі. 2019. № 4 (95). С. 59–66. <http://doi.org/10.37734/2409-6873-2019-4-7>
5. Захарченко Н. В., Маслій Н. Д., Мамуненко М. С. Вплив електронного документообігу на ефективність діяльності організації // Молодий вчений. Травень 2017. № 5 (45). С. 582–587. URL: <http://molodyvcheny.in.ua> › 2017 › 5\_45\_2017 (дата звернення: 02.08.2023).
6. Задорожна Н. Т., Лавріщева К. М. Кероване проектування документообігу в управлінських інформаційних системах // Проблеми програмування. 2006. № 4. С. 37–48. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/2329> (дата звернення: 02.08.2023).

7. Величкевич М. Б., Мітрофан Н. В., Кунанець Н. Е. Електронний документообіг, тенденції та перспективи // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. 2010. № 2 (689). С. 44–53. URL: <http://ena.lp.edu.ua> (дата звернення: 02.08.2023).
8. Пількевич І. А., Мірошніченко С. І. Документообіг як підсистема АСУ організації // Тези доповідей IV Всеукр. наук.-техн. конф. «Комп’ютерні технології: інновації, проблеми, рішення». (18–20 листопада 2021). Житомир : ДУ «Житомирська політехніка», 2021. С. 70–71. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/02/70.pdf> (дата звернення: 02.08.2023).
9. Про електронні документи та електронний документообіг : Закон України від 01.08.2022 № 851-IV (зі змінами, внесеними згідно із Законом України № 2801-IX від 01.12.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15#Text> (дата звернення: 20.05.2023).

Стаття надійшла до редакції 21.09.2023.

## REFERENCES

1. Pro Natsionalnu prohramu informatyzatsii : Zakon Ukrainy 2807-IX vid 01.12.2022 [On the National Informatization Program: Law of Ukraine 2807-IX from 01.12.2022]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2807-20#Text> [in Ukrainian].
2. Levchenko, A. O., Trutniev, S. H., Ismailova, N. P., & Sharypova, I. V. (2022). Prohramna realizatsiia pidsystem obminu danymy ekspertiv u rozpodilynykh kompleksakh imitatsiinoho modeliuvannya boiovykh dii [Software Implementation of Experts Data Exchange Sub-Systems in Distributed Complexes for Simulation of Combat Actions]. *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]*, Iss. 22, 4–13. <http://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22.01> [in Ukrainian].
3. Matviienko, O. V., & Tsyvin, M. N. (2008). *Osnovy orhanizatsii elektronnoho dokumentoobihu : navch. posib. [Basics of the Organization of Electronic Document Management: teaching. manual]*. Kyiv [in Ukrainian].
4. Piddubna, L. V., & Pavlichenko, V. M. (2019). Informatsiina bezpeka v systemakh elektronnoho dokumentoobihu [Information Security in Electronic Document Management Systems]. *Naukovyi visnyk Poltavsk. un-tu ekonomiky i torhivli [Scientific Bulletin of Poltava University of Economics and Trade]*, 4 (95), 59–66. <http://doi.org/10.37734/2409-6873-2019-4-7> [in Ukrainian].
5. Zakharchenko, N. V., Maslii, N. D., & Mamunencko, M. S. (2017). Vplyv elektronnoho dokumentoobihu na efektyvnist diialnosti orhanizatsii [The Impact of Electronic Document Management on the Effectiveness of the Organization]. *Molodyi vchenyi [Young Scientist]*, 5 (45), 582–587. Retrived from [http://molodyvcheny.in.ua20175\\_45\\_2017](http://molodyvcheny.in.ua20175_45_2017) [in Ukrainian].
6. Zadorozhna, N. T., & Lavrishcheva, K. M. (2006). Kerovane proiektuvannia dokumentoobihu v upravlinskykh informatsiinykh systemakh [Controlled Design of Document Flow in Management Information Systems]. *Problemy prohramuvannia [Problems of Programming]*, 4, 37–48. Retrived from <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/2329> [in Ukrainian].
7. Velychkevych, M. B., Mitrofan, N. V., & Kunanets, N. E. (2010). Elektronnyi dokumentoobih,

tendentsii ta perspektyvy [Electronic Document Circulation, Trends and Perspectives]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"]*, 2 (689), 44–53. Retrived from <http://ena.lp.edu.ua> [in Ukrainian].

8. Pilkevych, I. A., & Miroshnichenko, S. I. (2021). Dokumentoobih yak pidsystema ASU orhanizatsii [Document Flow as a Subsystem of the Organization's ACS]. In *Tezy dopovidei IV Vseukr. nauk.-tekhn. konf. «Komp'uterni tekhnolohii: innovatsii, problemy, rishennia» [Abstracts of reports IV All-Ukrainian. science and technology conf. "Computer technologies: innovations, problems, solutions"]*. (November 18–20, 2021). (pp. 70–71). Zhytomyr: SU «Zhytomyr Polytechnic». Retrived from <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/02/70.pdf> [in Ukrainian].

9. Pro elektronni dokumenty ta elektronnyi dokumentoobih : Zakon Ukrainy vid 01.08.2022 № 851-IV (zi zminamy, vnesenymy zghidno iz Zakonom Ukrainy vid 01.12.2022 № 2801-IX) [On Electronic Documents and Electronic Document Flow: Law of Ukraine from 01.08.2022 № 851-IV and from 01.12.2022 № 2801-IX]. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15#Text> [in Ukrainian].

**I. A. Pilkevych, S. I. Miroshnichenko**

## **MODEL OF THE INFORMATION SYSTEM OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT OF THE TERRITORIALLY DISTRIBUTED SUBDIVISIONS OF THE ENTERPRISE**

*Informatization of all processes that take place in the day-to-day activities of the enterprise is currently used to create effective mechanisms for the interaction of individual units of the enterprise. The intensive development of information systems creates conditions for the development and implementation of modern information tools that allow automating and thus more effectively implementing management processes. Together with the growing complexity of information systems and the information technologies used in them, the amount of requirements that are put forward to them increases.*

*One of the areas of implementation of information systems in modern conditions is electronic document management systems, which provide data exchange between separate units, quick delivery of specific documents to designated officials, as well as information and analytical activities of the entire enterprise.*

*The main role in ensuring the operation of information systems is played by databases, which are a way of obtaining the necessary information. Accumulation of information on various types of enterprise activities takes place in automated management systems, which must ensure the work of individual units of the same enterprise.*

*The paper describes the operation of the proposed electronic document flow system, presents the algorithm of the information system model, as well as the functional diagram of the electronic document flow system of a separate enterprise. The database tables are examined in detail and the connection diagram of these tables is presented, as well as the proposed example of the main form of the program and the information page of the specified user.*

*The proposed information system can be implemented using the MySQL database management system and its practical use will be free.*

**Keywords:** *electronic document management; database; information system model; automated control system.*

О. Ф. Дубина, С. О. Соболенко, І. В. Пулеко, О. В. Андреев, А. Ю. Денисюк

## ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ОХОРОНИ

Захист й охорона здоров'я, життя, місця проживання, матеріальної та інтелектуальної власності людини є важливим завданням на сучасному етапі розвитку суспільства. Для розв'язання цієї проблеми використовують системи безпеки й охорони, в основі яких юридичні, організаційні, морально-етичні, апаратно-програмні методи та засоби. Вони повинні відповідати правовим нормам і вимогам, що висувуються до кожної категорії об'єктів захисту. Одним із важливих апаратно-програмних засобів охорони є елементи та пристрої електронної техніки, зокрема сенсорні пристрої. В основу їх функціонування покладено досягнення фізики твердого тіла, оптики, електрооптики, електроакустики та інше. Сучасні електронні технології дають можливість створювати ефективні мікроелектронні сенсорні пристрої для систем безпеки й охорони, функціонування яких полягає у використанні оптичних, механічних, магнітних, п'єзоелектричних, тензометричних, ємнісних та інших типів сигнальних перетворювачів. У процесі побудови сучасних систем безпеки й охорони необхідно, з одного боку, володіти інформацією про можливості та особливості функціонування окремих складових елементів, які забезпечують виконання завдання з охорони об'єкта, а з іншого – необхідно мати оцінку ефективності розробленої системи, яка повинна включати як показники надійності усіх елементів і каналів передачі інформації, так і показники ефективності виконання функціонального завдання.

Розроблена математична модель ефективності застосування системи охорони надасть можливість правильно вибрати елементи системи, параметри яких найповніше забезпечать виконання завдання. Такий підхід сприяє організації взаємодії систем охоронної сигналізації, пожежної сигналізації, системи контролю доступу, системи відеоспостереження та пультів централізованої охорони.

**Ключові слова:** комплекс технічних засобів; датчик системи охорони; пульт централізованої охорони; ефективність системи охорони.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** У сучасних умовах системи охорони об'єктів є невід'ємною частиною будь-якого офісу, підприємства, приватного домогосподарства тощо. У цілому така система є комплексною і включає в себе: відеоспостереження, охоронну та пожежну сигналізації, систему контролю доступу [9]. Відповідно до сучасних вимог з безпеки об'єктів система охорони складається із певної кількості рівнів залежно від значущості об'єкта. При цьому засоби комплексної охоронної системи, які можуть бути використані для оснащення рівнів, повинні відповідати широкому колу вимог, серед яких на перший план виступає необхідність виконання завдання не лише прийняття рішення про виявлені або невиявлені об'єкти, але й проведення їх класифікації залежно від призначення.

© О. Ф. Дубина, С. О. Соболенко, І. В. Пулеко, О. В. Андреев, А. Ю. Денисюк, 2023

Ця інформація може надходити як на пультову системи охорони, так і на засоби власника (комп'ютер або мобільний телефон), як дротовими, так і бездротовими каналами зв'язку. Це дозволить здійснювати управлінські дії, спрямовані на вжиття адекватних заходів, пов'язаних із процесом постановки завдань силам реагування, зокрема групі затримання. Разом із тим така постановка завдання потребує вдосконалення датчиків охоронних систем у частині розширення функціональних можливостей, пов'язаних із формуванням розширеного формату даних про об'єкт.

Цей підхід вимагає уточнення приватних, узагальнених та комплексних показників для застосування комплексу технічних засобів (КТЗ) в охоронних системах відповідно до покладених завдань. Тому виникає проблема вибору функції-моделі оцінки ефективності автоматизованих систем охорони об'єктів даного типу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день тематика охоронних систем є досить актуальною як у виробництві, так і в наукових дослідженнях. Так, у [2] визначено фактори успіху управління інформаційною безпекою, у [3] показано зниження продуктивності праці співробітників під час впровадження механізмів контролю доступу технологій інформаційної безпеки. У [1, 4, 10] описано теперішній рівень автоматизації для забезпечення роботи домашніх (приватних) систем безпеки. У [8] проаналізовано значну кількість факторів, що визначають якісні й кількісні показники комплексної системи охорони об'єкта. Однак слід зауважити, що мало досліджено питання моделювання системи охорони щодо її ефективності.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є розроблення математичної моделі оцінювання ефективності системи охорони об'єкта.

**Виклад основного матеріалу.** У загальному випадку показники ефективності автоматизованої охоронної системи можуть включати, з одного боку, ті, що характеризують КТЗ систем охорони, з іншого – показники, які враховують людський чинник. З огляду на те, що технічна складова КТЗ систем охорони є визначальною у надійності їх структур, надалі обмежимося першою групою показників.

Для визначення ефективності системи охорони скористаємося підходом, за якого процес оцінювання ефективності систем охорони об'єкта складається з низки етапів, що включають, по-перше, поетапне перетворення структур систем окремих показників, по-друге, їх узагальнення в показник, що містить моделі об'єднання нижнього рівня, а саме комплексний (інтегральний) показник ефективності. Під час аналізу КТЗ варто розглянути інформаційні елементи (ІЕ), під якими розумітимемо найпростіші елементи охорони об'єкта, що відображають джерела (канали) інформації.

Кожен ІЕ (датчик, канал зв'язку) характеризується такими показниками ефективності, як  $K_{д}$ ,  $K_{лз}$ , що мають сенс узагальнювальних показників ефективності як за рахунок застосування датчиків охорони, що виконують завдання типу «виявлення – розпізнавання» об'єктів, так і завдяки застосуванню ліній зв'язку (проводових або радіозв'язку) відповідно.

З іншого боку, кожен ІЕ характеризується показниками ефективності, а саме  $K_{нд}$ ,  $K_{нлз}$ , що мають узагальнювальний сенс і визначають надійнісні характеристики сповіщувачів комбінованого типу та ліній зв'язку відповідно.



Виявлені та розпізнані властивості КТЗ системи охорони пов'язані з рішеннями щодо видачі інформації з необхідними показниками про об'єкт на пультову систему охорони, вони можуть бути описані ймовірностями: правильного виявлення сигналу датчиками, помилкової або правильної класифікації об'єктів, своєчасності обробки інформації в тракці сигнального розпізнавання.

Надійнісні характеристики КТЗ пов'язані з раптовими відмовами, що виникають у процесі експлуатації охоронних систем і характеризуються набором показників, серед яких можуть бути виділені, наприклад, імовірності безвідмовної роботи, своєчасної видачі інформації каналами зв'язку, ефективності виконаного завдання в них.

Викладене дозволяє уявити якість функціонування КТЗ системи охорони об'єкта на основі ефективності та надійності КТЗ у такому вигляді:

$$V_e = \|V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\|. \quad (1)$$

У виразі (1) компоненти  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  – показники ефективності, що характеризують виявлення об'єкта датчиками, правильність його класифікації, своєчасність надання інформації каналами зв'язку, надійнісні характеристики датчиків та ліній зв'язку відповідно.

У загальному випадку в ході побудови систем охорони для оцінювання складових компонентів  $V_1$  і  $V_2$ , що входять у вираз (1), можна ввести ймовірнісні показники:

$P_O$  – імовірність виявлення об'єкта датчиками;

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

$P_{CB}$  – імовірність, що характеризує своєчасність обробки інформації в тракці сигнального розпізнавання.

Слід зауважити, що для аналізу охоронних систем необхідно враховувати два фактори: по-перше, елементна база в ході створення датчиків і каналів зв'язку характеризується раптовими відмовами, тобто вказані вище ІЕ в процесі експлуатації мають зрештою напрацювання на відмову; по-друге, необхідно забезпечити видачу інформації протягом часу, що не перевищує встановленої нормативної вимоги. У цьому разі для оцінювання елементів структур системи охорони об'єктів доцільно компоненти векторного показника подати ймовірнісними показниками та доповнити такими характеристиками надійності: імовірність безвідмовної роботи датчика  $P_H^D$ , імовірність безвідмовної роботи каналу зв'язку  $P_H^{K3}$  та імовірність виконання, що характеризує своєчасність видачі інформації каналом зв'язку  $P_{CB}^{K3}$ .

З урахуванням викладеного векторний показник, описаний виразом (1), матиме такий вигляд:

$$V_e = \|P_O, P_{KL}, P_{CB}, P_H^D, P_H^{K3}, P_{CB}^{K3}\|. \quad (2)$$

На первинному етапі роботи системи охорони відбувається процес виявлення об'єкта з імовірністю  $P_O$  засобами виявлення (ЗВ). Це практично визначає наступні етапи

обробки й виконання завдання системою охорони в цілому. Багаторівнева система охорони утворюється, як правило, на основі застосування ЗВ, що працюють на різних принципах.

Аналіз схем побудови комбінованих засобів виявлення (КЗВ) показав, що в наш час серед розроблюваних і розроблених систем (комплексів) найбільшого поширення набули схеми логічної обробки (бінарних сигналів тривоги з окремих ЗВ)  $K$  з  $N$ , наприклад: 2 з 3 ( $N = 3, K = 2$ ). Для цієї схеми ймовірність виявлення складається з ймовірностей тих комбінацій, у яких присутні дві або три одиниці [11]:

$$P_{2/3} = \sum_{j=1}^4 \Delta P_j.$$

За аналогією до засобів радіолокації, розпізнавання об'єктів, що належать до кінцевого алфавіту, наприклад  $k$  класам, відбувається на тлі різноманітних непередбачуваних перешкод різного виду. Причому найчастіше йдеться про вплив флуктуаційних шумів. Даний факт вказує на ймовірнісний характер процесу класифікації об'єктів і може характеризуватися як розгорнутим критерієм ефективності, що містить елементи матриці ймовірностей правильних і помилкових рішень, так й усіченим, описаним, наприклад, лише ймовірностями правильної класифікації  $P_{пр}$ . Однак у разі зіставлення ефективності різних алгоритмів розпізнавання в умовах багатоальтернативної класифікації об'єктів вважають за краще оперувати величиною ймовірності помилки класифікації  $P_{пом}$ , яка може бути оцінена з матриці альтернативних рішень, що виносяться за  $k$  класами об'єктів. Матриця альтернативних рішень, що містить рядки та стовпці, відповідні  $k$  класам об'єктів, що розпізнаються, має такий вигляд:

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & \dots & P_{1k} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{k1} & \dots & P_{kk} \end{vmatrix}.$$

Отже, виходячи з розгорнутого критерію ефективності, величина ймовірності помилки класифікації об'єктів може бути визначена як

$$P_{пом} = 1 - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_{ii}.$$

Елементи  $P_{ij}, i=j$  під знаком суми – вірогідності правильного розпізнавання з матриці альтернативних рішень.

У виразі (1) показники  $V_1, V_2$ , що враховують достовірність та своєчасність обробки інформації сповіщувачами комбінованого типу, з огляду на їх об'єднання в аналітичному вигляді, можуть бути подані в такий спосіб:

$$V_{12} = P_o(1 - P_{пом})P_{св}. \quad (3)$$

У процесі оцінювання складових компонентів  $V_3$  і  $V_4$ , що входять у вираз (2), необхідно враховувати той факт, що раптова відмова будь-якого типу ІЕ системи охорони

веде до порушення її працездатності. Це свідчить про послідовну схему надійності ІЕ в системі охорони. Враховуючи, що надійність у системі ототожнюється з властивістю КТЗ нормально функціонувати протягом певного часу, замість введених імовірностей безвідмовної роботи сповіщувачів комбінованого типу та ймовірностей безвідмовної роботи каналу зв'язку слід ввести імовірність безвідмовної роботи КТ  $P_{BP}$ , яку можна описати таким виразом:

$$P_{BP} = e^{-\Delta t \sum_n a_n}, \quad (4)$$

де індекс вказує на належність до  $n$ -го типу ІЕ, а саме:

$n = 1$  – сповіщувач комбінованого типу;

$n = 2$  – канал зв'язку дротовою лінією зв'язку;

$n = 3$  – канал зв'язку бездротовою лінією зв'язку;

$\Delta t$  – тимчасовий інтервал безвідмовної роботи КТЗ системи охорони на інтервалі часу від 0 до  $t$ ;

$\sum_n a_n$  – сумарна інтенсивність відмов типів ІЕ.

Враховуючи, що в даний час у системах охорони під час виготовлення ІЕ використовують останні досягнення мікроелектроніки, а саме інтегральні технології, наведені типи ІЕ приблизно рівнонадійні. У цьому разі з практичного погляду у виразі (2) можна оперувати величиною середньої інтенсивності відмов, яку визначимо як

$$a_{\text{сеп}} = \frac{\sum_n a_n}{n}. \quad (5)$$

Тоді у виразі (2) поряд із величинами  $P_H^D$ ,  $P_H^{K3}$  можна оперувати величиною середньої інтенсивності відмов  $P_H^{\text{сеп}}$  [11].

Відповідно до цього підходу компоненти  $V_3$  і  $V_4$  перетворюються на показник  $V_{34}$ , який з урахуванням виразу (5) може бути поданий у вигляді середньої ймовірності безвідмовної роботи КТЗ на інтервалі часу

$$P_H^{\text{сеп}} = e^{-\Delta t a_{\text{сеп}}}. \quad (6)$$

Для оцінювання компонента  $V_5$  необхідно враховувати той факт, що для фізично справного каналу зв'язку потрібно забезпечити своєчасність видачі інформації з імовірністю виконання  $P_{CB}^{K3}$ . Оцінка даної ймовірності практично труднощів не викликає, тому що нормативний час у разі використання каналу зв'язку вказується в керівних документах.

Враховуючи мультиплікативний підхід до об'єднання узагальнювальних показників, можна отримати з (2) показник ефективності та надійності КТЗ системи охорони й записати його в аналітичному вигляді як

$$V_e = P_O (1 - P_{ПОМ}) P_{CB}, P_H^{\text{сеп}}, P_{CB}^{K3}. \quad (7)$$

Аналіз відомих методик показав, що цілком оптимально оцінювати ефективність КТЗ як складну інформаційну систему і характеризувати декількома частковими показниками, на підставі яких формується загальний критерій [7].

Отримані аналітичні вирази дозволяють сформулювати оптимізаційну задачу визначення найкращої структури КТЗ інтегрованої системи охорони у вигляді такого співвідношення:

$$s_{c,l}^* = \arg \max V_e(s_{c,l}), \quad (8)$$

де

$$s_{m,n} \in C, C \in \{s_1, s_2 \dots s_c; s_1, s_2 \dots s_l\}, m = 1, \dots c; n = 1, \dots l. \quad (9)$$

У виразі (8) індекс  $c$  означає кількість датчиків,  $l$  – кількість каналів зв'язку, що входять до складу КТС системи охорони об'єктів, які відповідають вимогам надійності, за обмежених ресурсних витрат.

Сучасні системи охорони об'єктів можуть застосовувати декілька каналів передачі інформації для підвищення надійності. Це може бути дротовий або Wi-Fi канал, один або декілька каналів мобільного зв'язку із залученням різних операторів. Крім того, для бездротового зв'язку може передбачатися основний і додатковий канали передачі даних на різних частотних діапазонах із використанням приватних (закритих) захищених протоколів.

**Висновки.** Розглянутий підхід до оцінювання якості функціонування технічної складової в автоматизованих системах охорони на основі використання імовірнісних показників дозволяє провести аналіз пристроїв КТЗ із позиції елемента автоматизованої інформаційної системи. За допомогою запропонованих аналітичних виразів можна оцінювати ефективність роботи КТЗ у рамках виконання поставлених завдань з урахуванням надійності їх структур та ймовірнісних показників інформаційних елементів.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Design and Construction of an Automatic Home Security System Based on GSM Technology and Embedded Microcontroller Unit / I. K. Olarewaju, O. E. Ayodele, F. O. Michael et al. // American Journal of Electrical and Computer Engineering. 2017. Vol. 1, No. 1. P. 25–32. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajece.20170101.14>
2. Ključnikov A., Mura L., Sklenár D. Information security management in SMEs: factors of success // Entrepreneurship and Sustainability. 2019. Iss. 6 (4). P. 2081–2094. [http://doi.org/10.9770/jesi.2019.6.4\(37\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2019.6.4(37))
3. Zeng W., Koutny M. Modelling and analysis of corporate efficiency and productivity loss associated with enterprise information security technologies // Journal of Information Security and Applications. 2019. No. 49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jisa.2019.102385>
4. Nwalozie G. C., Aniedu A. N., Nwokoye C. S. & Abazuonu I. E. Enhancing Home Security Using SMS-based Intruder Detection System // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. June 2015. Vol. 4, Iss. 6. P. 1177–1184.

5. Грицунов О. В. Інформаційні системи та технології : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2010. 222 с.
6. Інформаційні системи і технології : навч. посіб. / [П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, К. С. Бабіч та ін.]. Київ : НАУ, 2013. 324 с.
7. Тольюпа С. В., Самохвалов Ю. Я., Цьопа Н. В. Комплексні системи захисту інформації спеціальних об'єктів та методика їх оцінки // Сучасний захист інформації. 2014. № 1. С. 81–88.
8. Єніна І. І. Обробка сигналів при несанкціонованих проникненнях на охороняємий об'єкт // Наукові записки. 2016. Вип. 19. С. 158–162.
9. 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.
10. Kaur S., Singh R., Khairwal N., & Jain P. Home Automation and Security System // *Advanced Computational Intelligence: An International Journal (ASCI)*. July 2016. Vol. 3, No. 3. P. 17–23.
11. Niels Richard Hansen. *Probability Theory and Statistics*. Department of Mathematical Sciences University of Copenhagen, November 2010. 296 p.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2023.

#### REFERENCES

1. Olarewaju, I. K., Ayodele, O. E., & Michael, F. O. et al. (2017). Design and Construction of an Automatic Home Security System Based on GSM Technology and Embedded Microcontroller Unit. *American Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 1, No. 1, 25–32. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ajece.20170101.14>
2. Ključnikov, A., Mura, L., & Sklenár, D. (2019). Information Security Management in SMEs: Factors of Success. *Entrepreneurship and Sustainability*, Iss. 6 (4), 2081–2094. [http://dx.doi.org/10.9770/jesi.2019.6.4\(37\)](http://dx.doi.org/10.9770/jesi.2019.6.4(37))
3. Zeng, W., & Koutny, M. (2019). Modelling and Analysis of Corporate Efficiency and Productivity Loss Associated with Enterprise Information Security Technologies. *Journal of Information Security and Applications*, 49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jisa.2019.102385>
4. Nwalozie, G. C., Aniedu, A. N., Nwokoye, C. S., & Abazuonu, I. E. (June 2015). Enhancing Home Security Using SMS-based Intruder Detection System. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, Vol. 4, Iss. 6, 1177–1184.
5. Hrytsunov, O. V. (2010). *Informatsiini systemy ta tekhnolohii : navch. posib. [Information Systems and Technologies: academic. manual]*. Kharkiv [in Ukrainian].
6. Pavlenko, P. M., Filonenko, S. F., & Babich, K. S. et al. (2013). *Informatsiini systemy i tekhnolohii : navch. posib. [Information Systems and Technologies: education. manual]*. Kyiv [in Ukrainian].
7. Toliupa, S. V., Samokhvalov, Iu. Ia., & Tsopa, N. V. (2014). Kompleksni systemy zakhystu informatsii spetsialnykh ob'ektiv ta metodyka yikh otsinky [Complex Information Protection Systems of Special Objects and Their Assessment Methods]. *Suchasnyi zakhyst informatsii [Modern Information Protection]*, 1, 81–88 [in Ukrainian].
8. Ієніна, І. І. (2016). Обробка сигналів при несанкціонованих проникненнях на охороняємий об'єкт [Signal Processing During Unauthorized Intrusions into a Protected Object]. *Naukovi zapysky [Scientific Notes]*, 19, 158–162 [in Ukrainian].

9. Barylo, H. I., Vistak, M. V., & Hotra, Z. Iu. et al. (2017). *Elektronni elementy ta prystroi system bezpeky y okhorony : navch. posib. [Electronic Elements and Devices of Safety and Security Systems: teaching. manual]*. Chernivtsi [in Ukrainian].
10. Kaur, S., Singh, R., Khairwal, N., & Jain, P. (July 2016). Home Automation and Security System. *Advanced Computational Intelligence: An International Journal (ASCII)*, Vol. 3, No. 3, 17–23. <http://dx.doi.org/10.5121/acii.2016.3303>
11. Niels, R. H. (November 2010). *Probability Theory and Statistics*. Department of Mathematical Sciences University of Copenhagen.

**O. F. Dubyna, S. O. Sobolenko, I. V. Puleko, O. V. Andreiev, A. Y. Denysiuk**

**APPROACH TO EVALUATING THE EFFICIENCY OF A COMPLEX SECURITY SYSTEM**

*Protection and protection of human health, life, habitat, material and intellectual property is an important task at the current stage of society's development. Security and protection systems based on legal, organizational, moral and ethical, hardware and software methods and tools are used to solve this problem. They must meet the legal norms and requirements that are put forward for each category of protection objects. One of the important hardware and software means of protection are elements and devices of electronic equipment, including sensor devices. Their functioning is based on the achievements of solid-state physics, optics, electro-optics, electro-acoustics, etc. Modern electronic technologies make it possible to create effective microelectronic sensor devices for security and protection systems, the functioning of which consists in the use of optical, mechanical, magnetic, piezoelectric, strainometric, capacitive and other types of signal transducers. In the process of building modern safety and security systems, it is necessary, on the one hand, to have information about the capabilities and peculiarities of the functioning of individual components that ensure the fulfillment of the task of protecting the object. On the other hand, it is necessary to have an assessment of the effectiveness of the developed system, which should include both reliability indicators of all elements and channels of information transmission, as well as indicators of the performance of the functional task.*

*The developed mathematical model of the efficiency of the application of the protection system will provide an opportunity to make the correct choice of the constituent elements of the system, the parameters of which most fully ensure the performance of the protection task. This approach ensures the organization of the interaction of security alarm systems, fire alarm systems, access control systems, video surveillance systems and centralized security consoles.*

**Keywords:** *complex of technical means; security system sensor; centralized security control panel; security system efficiency.*

О. А. Нагорнюк

**БАЗА ДАНИХ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ТИПУ  
БЕЗПЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЗА ЙОГО РАДІОСИГНАЛАМИ**

*Виявлення та технічний аналіз випромінювання радіопередавачів елементів безпілотних авіаційних комплексів дозволяє встановити факт їх використання та ідентифікувати тип. Розпізнавання типу безпілотного авіаційного комплексу за його радіосигналами здійснюється шляхом порівняння їх визначених параметрів із відомими значеннями, що зберігаються в базі даних. У статті запропоновано структуру такої бази даних радіосигналів безпілотних авіаційних комплексів, що ґрунтується на реляційній моделі даних. Вона становить собою сукупність взаємозалежних двовимірних таблиць, у яких зібрана інформація про параметри та характеристики радіосигналів каналів управління, телеметрії та передачі цільової інформації, частоти роботи приймачів супутникової радіонавігаційної системи, а також вказано призначення, належність, аеродинамічну схему, зовнішній вигляд, основні тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу та рекомендації з протидії йому. Інформація про характеристики радіосигналів каналів безпілотного авіаційного комплексу містить дані про: частотні діапазони роботи радіоканалу, параметри розширення спектра та модуляції, зображення амплітудно-частотних спектрів і спектрограм. Використання зібраної в базі даних інформації дозволяє розпізнавати тип безпілотного авіаційного комплексу за його радіосигналами та приймати рішення про діапазони частот, у яких буде здійснюватися радіоподавлення приймачів радіоканалів, навігаційної апаратури, а також вибирати найбільш ефективні за структурою радіоперешкоди. Відповідно до запропонованої структури розроблено спеціальне програмне забезпечення бази даних радіосигналів безпілотних авіаційних комплексів, яке робить можливим перегляд, редагування, копіювання, додавання нової інформації про безпілотні авіаційні комплекси, параметри та характеристики їх радіоканалів, а також пошук. Інтерфейс користувача забезпечує одночасний перегляд усієї інформації щодо безпілотного авіаційного комплексу, параметрів та характеристик його радіосигналів.*

**Ключові слова:** база даних; радіосигнал; безпілотний авіаційний комплекс; параметр; характеристика; ідентифікація; протидія; програмне забезпечення.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Досвід російсько-української війни свідчить, що однією з основних особливостей ведення бойових дій (операцій) є широке застосування сучасних засобів повітряного нападу, зокрема безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) різного призначення. У зв'язку зі зростаючою кількістю різних типів цього виду озброєння та його можливостями, радіоелектронна протидія безпілотним літальним апаратам (БпЛА) належить до найбільш важливих завдань, які вирішують підрозділи радіоелектронної боротьби Сил оборони України [2, 3].

Одним з основних факторів, що впливають на ефективність виконання цих завдань, є виявлення й ідентифікація елементів БпАК, переважна більшість яких у процесі

© О. А. Нагорнюк, 2023

застосування здійснює радіообмін між БпЛА та станцією керування й контролю (СКК) [4]. Виявлення та технічний аналіз випромінювання передавачів елементів БпАК дозволяє встановити факт їх використання та ідентифікувати тип. Розпізнавання типу БпАК за їх радіосигналами здійснюється шляхом порівняння оцінених характеристик та параметрів радіосигналів із відомими значеннями, що зберігаються в базі даних [5]. Тому актуальним науково-практичним завданням є розроблення бази даних радіосигналів, структура якої оптимізована для зберігання параметрів та характеристик радіоканалів БпАК.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [6] запропоновано базу даних для зберігання модуляційних ознак радіосигналів бездротових систем зв'язку, яку використовують для визначення виду модуляції невідомих сигналів багатовимірною гібридною мережею. У [7] показано базу даних телекомунікаційних радіосигналів, зібраних із використанням програмно визначеного радіо (software-defined radio (SDR)). Розглянуто метод збору даних за допомогою SDR трансивера та порівнюються точності алгоритмів розпізнавання, навчених на зібраному наборі даних. У [8] описано набір 227 записаних сегментів радіосигналів трьох різних БпАК, що працюють у різних режимах, а також записи фонові радіочастотної активності без наявності сигналів БпАК. У [9] розглянуто структуру систем зв'язку та передачі даних БпАК, а також стан розвитку пов'язаних технологій та напрямки майбутніх досліджень. У [10–12] проведено огляд відомих підходів до виявлення та розпізнавання БпЛА за їх радіосигналами. У [5] запропоновано методика визначення БпАК за його радіосигналами, яка ґрунтується на порівнянні оцінених параметрів радіосигналів із відомими значеннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що для розпізнавання типів БпАК використовують фрагменти записів радіосигналів або їх параметри. Однак відомі бази даних містять лише часткову інформацію про можливі параметри радіосигналів БпАК, достатню лише для реалізації алгоритмів ідентифікації, що її використовують. Наявна в них інформація про радіосигнали БпАК не дозволяє розпізнати його тип у разі обмежених можливостей із визначення параметрів радіосигналів. Крім того, відомі бази не містять тактико-технічних характеристик (ТТХ) БпАК та рекомендацій з протидії їм.

**Метою статті** є розроблення бази даних радіосигналів БпАК, структура якої налаштована для зберігання параметрів та характеристик їх радіоканалів, задля автоматизованого розпізнавання типу БпАК та забезпечення протидії йому.

**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення можливості розпізнавання типу БпАК за його радіосигналами та виконання подальших заходів із протидії база даних радіосигналів повинна містити інформацію як про параметри сигналів радіоканалів БпАК, за якими можна здійснити ідентифікацію його типу, так і про основні ТТХ та ефективні способи протидії йому.

Залежно від призначення та особливостей побудови в БпАК може бути реалізовано декілька радіоканалів, які функціонально можна розділити на чотири групи: командний; телеметрії; передачі цільової інформації; резервний. Командний радіоканал використовується для передачі команд із СКК на БпЛА (зміна параметрів руху, керування цільовим навантаженням тощо). Радіоканал телеметрії слугує для передачі інформації із БпЛА на СКК (параметри бортових систем, положення БпЛА в просторі, швидкість руху,



параметри роботи навігаційного обладнання тощо). Радіоканал передачі цільової інформації призначений для передачі даних від цільового навантаження БпЛА на СКК (передача відео із бортової камери тощо). Резервний радіоканал використовується для передачі команд управління та телеметрії в разі виходу з ладу основного командного (командно-телеметричного) радіоканалу.

Аналіз наявної інформації про структуру та параметри радіосигналів БпАК, а також відомі методи й алгоритми виявлення та розпізнавання типу БпАК [2, 5, 8–12] показав, що як ознаки для ідентифікації можна використовувати такі характеристики та параметри радіосигналів:

- амплітудно-частотний спектр (АЧС);
- спектрограму;
- частотний діапазон роботи радіоканалу;
- ширину накопиченого АЧС;
- ширину АЧС одного частотного елемента;
- метод та параметри розширення спектра радіосигналу;
- вид та параметри модуляції радіосигналу;
- часові положення та амплітуду піків автокореляційної функції (АКФ);
- сталі символні послідовності.

Для забезпечення вжиття своєчасних заходів із протидії виявленим БпАК до бази даних їх радіосигналів необхідно включити інформацію про призначення, основні ТТХ БпАК, зовнішній вигляд БпЛА, частотні діапазони роботи приймачів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) та рекомендації з протидії кожному типу БпАК.

Після виявлення та ідентифікації типу БпАК за його радіосигналами наявна в базі даних інформація має забезпечувати, за необхідності, підтвердження визначеного типу БпАК шляхом порівняння фото БпЛА із отриманим засобами візуального спостереження. Крім того, зосереджена в базі інформація щодо способів протидії БпАК повинна забезпечити виконання підрозділами, що функціонують у системі боротьби з БпАК, реалізацію заходів із ефективної протидії (маскування, зміна позиції, радіоподавлення, вогневе ураження тощо).

Отже, база даних має містити інформацію, яку можна подати в табличному вигляді, що дозволяє її реалізувати відповідно до принципів організації реляційних баз даних, які широко застосовуються в теперішній час [13–14]. Розповсюдження реляційних баз даних пов'язане із низкою їх переваг, серед яких: зручність роботи з даними; простота й доступність розуміння користувачем; можливість використовувати складні високорівневі запити; легкість масштабування без порушення структури бази даних; для організації запитів і написання прикладного програмного забезпечення не потрібно знати її конкретну організацію в зовнішній пам'яті. У реляційних базах інформація систематизована у вигляді набору формально описаних таблиць, із яких дані можуть бути доступними або повторно зібраними багатьма різними способами без необхідності реорганізації таблиць цілої бази.

Відповідно до викладеного вище та відомих підходів до організації реляційних баз даних розроблено структуру бази даних, яка зображена на рис. 1.

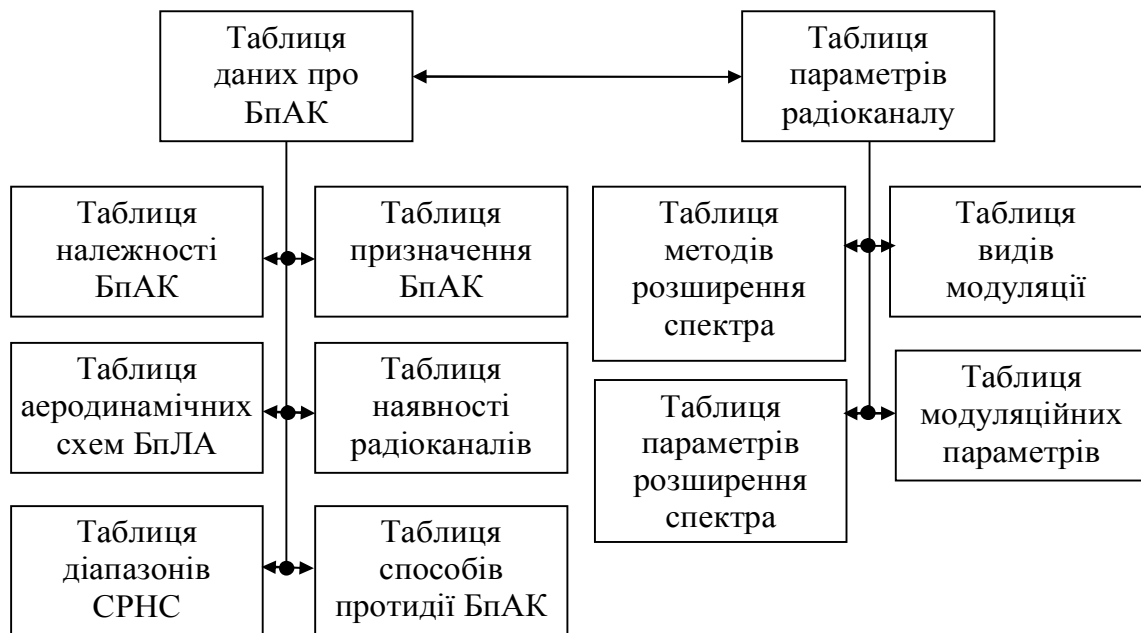


Рис. 1. Структура бази даних радіосигналів БпАК

База даних радіосигналів БпАК складається із таких 12 таблиць:

- таблиця даних про БпАК;
- таблиця параметрів радіоканалу;
- таблиця належності БпАК;
- таблиця призначення БпАК;
- таблиця аеродинамічних схем БпЛА;
- таблиця діапазонів СРНС;
- таблиця ідентифікаторів наявності (суміщеності) радіоканалів;
- таблиця методів розширення спектра радіосигналу;
- таблиця видів модуляції радіосигналу;
- таблиця параметрів розширення спектра;
- таблиця параметрів модуляції;
- таблиця способів протидії БпАК.

У таблиці даних про БпАК міститься така інформація: назва (тип); належність до своїх військ чи військ противника; призначення; аеродинамічна схема; опис основних ТТХ БпАК; зображення БпЛА; наявність (суміщеність) командного радіоканалу; ідентифікатор рядка таблиці параметрів радіоканалу, де міститься інформація про параметри командного радіоканалу; наявність (суміщеність) телеметричного радіоканалу; ідентифікатор рядка таблиці параметрів радіоканалу, де міститься інформація про параметри телеметричного радіоканалу; наявність (суміщеність) радіоканалу передачі цільової інформації; ідентифікатор рядка таблиці параметрів радіоканалу, де міститься інформація про параметри радіоканалу передачі цільової інформації; наявність (суміщеність) резервного радіоканалу; ідентифікатор рядка таблиці параметрів радіоканалу, де міститься інформація про параметри резервного радіоканалу; перелік частотних діапазонів СРНС, які використовує БпЛА; дата та час внесення (зміни) даних; ідентифікатор користувача, що додав (змінив) дані.

У таблиці параметрів радіоканалу вказано: назву радіоканалу; мінімальну / максимальну частоту робочого діапазону; ширину накопиченого АЧС; ширину АЧС частотного елемента; метод та параметри розширення спектра; вид модуляції; модуляційні параметри; зображення АЧС сигналу; зображення спектрограми сигналу; сталі символічні послідовності; дату та час внесення (зміни) даних; рівень достовірності інформації; ідентифікатор користувача, що додав (змінив) дані.

Пропонуємо використовувати чотири рівні достовірності інформації про параметри радіоканалів БпАК:

перший, якщо дані про радіосигнали отримані шляхом радіоперехоплення за високої ймовірності знаходження в цьому районі вказаного типу БпАК;

другий, якщо дані про радіосигнали отримані шляхом аналізу технічних описів радіоелементної бази, що використовується в радіоканалах БпАК (інформація про радіоелектронні компоненти може бути отримана шляхом аналізу непрацевдатних трофейних зразків);

третій, якщо дані про радіосигнали отримані шляхом радіоперехоплення в разі знаходження в заданому районі вказаного типу БпАК (підтверджено візуально або іншим засобом розвідки), за умови, що напрямок надходження сигналу (пеленг) відповідає напрямку реального місцезнаходження БпЛА (СКК);

четвертий, якщо дані про радіосигнали отримані шляхом запису та аналізу сигналів радіоканалів трофейних БпЛА та СКК.

*Таблиця належності БпАК* містить перелік можливих значень: противника; своїх військ; загального користування; належність невідома.

До БпАК загального користування належать ті, які можуть застосовуватися як підрозділами своїх військ, так і противником. Наприклад, моделі БпАК виробництва компаній SZ DJI Technology Co. та Autel Technology, FPV-БпЛА із радіомодулями, що використовують відомі протоколи передачі даних (CROSSFIRE, ExpressLRS, FrSky D8 (D16, ACCESS) тощо).

*Таблиця призначення БпАК* містить перелік можливих значень: розвідувальний; ударний; розвідувально-ударний; багатоцільовий; ударний камікадзе; радіоелектронної розвідки; радіоелектронної боротьби; мішень; для спеціальних завдань; призначення невідоме.

*Таблицею аеродинамічних схем БпЛА* передбачено: літак; крило; Х-літак; коптер; аеродинамічна схема невідома.

*Таблиця наявності радіоканалів* містить перелік можливих значень даних про присутність в БпАК радіоканалів або їх суміщеність: присутній; відсутній; суміщений із командним / телеметричним / резервним радіоканалом або із радіоканалом передачі даних.

*Таблиця діапазонів СРНС* надає такий перелік діапазонів роботи апаратури споживачів СРНС БпЛА: GpsL1; GpsL2; GpsL5, GalileoE1; GalileoE5a; GalileoE5ap; GalileoE5b; GalileoE6; BeidouB1C; BeidouB1I; BeidouB3; BeidouB2; BeidouB2a; GlonassL1; GlonassL2; діапазони невідомі. Частотні діапазони та основні параметри радіосигналів вказаних СРНС подано в [15]. Також у таблиці міститься ідентифікатор наявності та тип перешкодозахищеної антенної системи приймання радіосигналів СРНС (controlled reception pattern antenna (CRPA)).

Таблиця методів розширення спектра містить перелік можливих значень: відсутнє; FHSS, DSSS, розширення невідоме.

Таблиця видів модуляції надає такий перелік: AM, ASK2, ASK4, MSK, GMSK, FSK2, FSK4, FSK8, FSK16, FSK32, FSK64, PSK2, PSK4, PSK8, PSK16, PSK- $\pi/4$ , OFDM, LFM, QAM4, QAM8, QAM16, QAM32, QAM64, QAM128, QAM256, QAM512, модуляція невідома.

Хоча лінійна частотна модуляція (linear frequency modulation (LFM)) по суті є методом розширення спектра сигналу, у запропонованій базі даних її віднесено до видів модуляції, оскільки багато радіоканалів БпАК використовують радіосигнали з комбінуванням LFM та псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти (frequency hopping spectrum spreading (FHSS)) [5].

Таблиця параметрів розширення спектра містить перелік можливих значень: мінімальна / максимальна тривалість частотного елемента; швидкість FHSS; крок сітки FHSS; мінімальна / максимальна кількість частот FHSS.

Таблицею модуляційних параметрів передбачено такі значення: символна швидкість; девіація частоти; тривалість інформаційного символу; кількість підканалів OFDM; символна швидкість підканалу OFDM; вид модуляції підканалу OFDM; фактор розширення LFM сигналів.

До таблиць належності, призначення, аеродинамічних схем БпАК, діапазонів СРНС, методів та параметрів розширення спектра, видів та параметрів модуляції можуть, за необхідності, додаватися нові значення.

Таблиця способів протидії БпАК містить відповідну інформацію та рекомендації щодо протидії.

Запропонована структура бази даних радіосигналів БпАК реалізована в спеціальному програмному забезпеченні (СПЗ), головне вікно якого зображено на рис. 2.

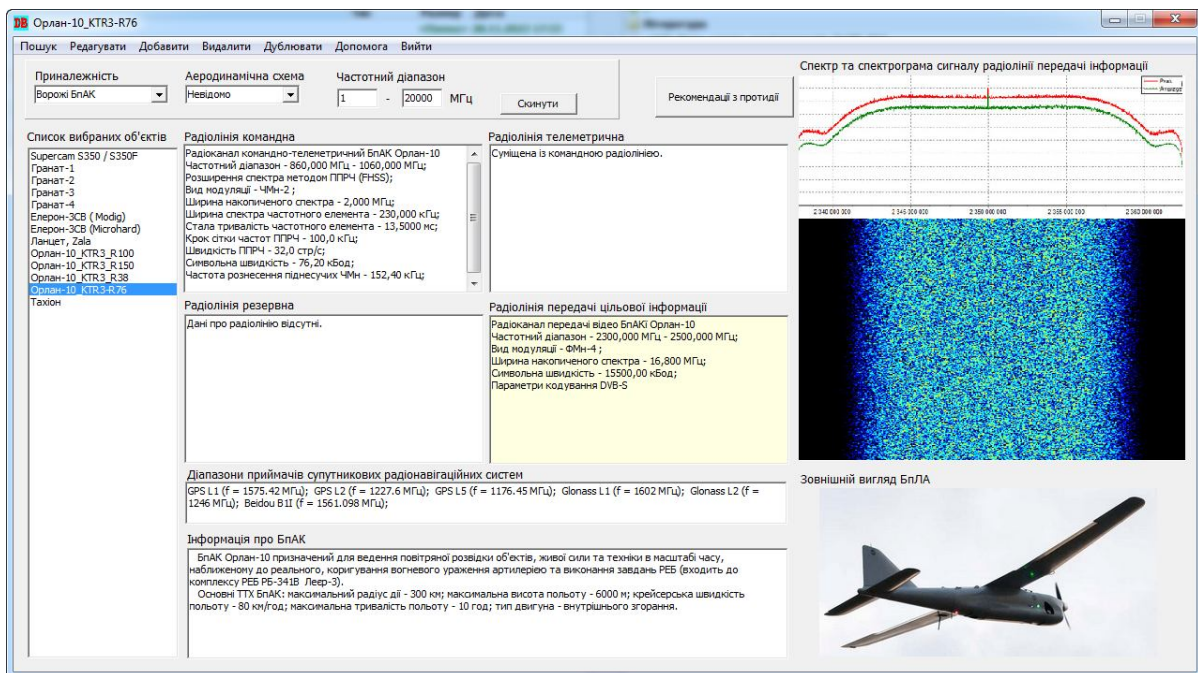


Рис. 2. Головне вікно бази даних для автоматизованого розпізнавання типу БпАК за його радіосигналами

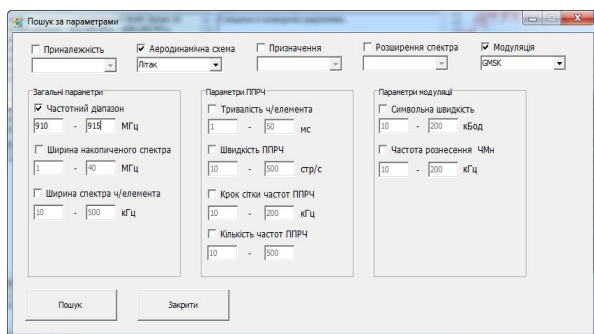
СПЗ дозволяє здійснювати перегляд, редагування, копіювання, додавання нової інформації про БпАК, параметри та характеристики їх радіоканалів, а також пошук і фільтрування за заданими параметрами.

У головному вікні СПЗ одночасно відображається вся наявна інформація про БпАК, параметри та характеристики їх радіосигналів, а саме:

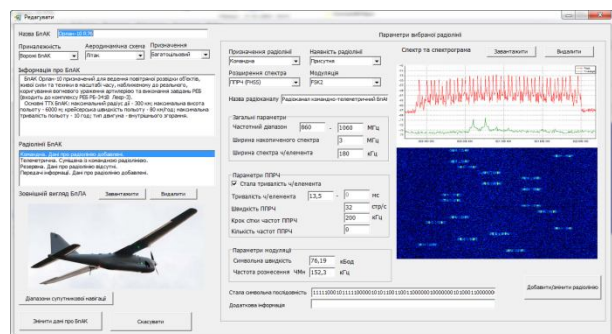
- перелік БпАК, які містяться в базі;
- параметри радіоканалів вибраного БпАК;
- АЧС та спектрограма сигналу виділеного радіоканалу вибраного БпАК;
- перелік та центральні частоти діапазонів роботи модулів СРНС вибраного БпАК;
- призначення та основні ТТХ вибраного БпАК;
- зовнішній вигляд БпЛА вибраного БпАК;
- елементи швидкого пошуку та фільтрування БпАК;
- меню інструментів роботи із базою даних.

Інформація, що одночасно відображається в головному вікні СПЗ, вибрана таким чином, щоб оператор мав можливість бачити кількість радіоканалів, які використовує БпАК та їх основні параметри, а також діапазони роботи СРНС. У процесі розвідки ця інформація дозволяє швидко налаштовувати радіоприймальні пристрої на можливі діапазони частот радіоканалів БпАК, а в ході радіоподавлення обрати необхідні параметри радіоперешкод. Наявність зображень АЧС та спектрограми дозволяє, у разі неможливості визначення параметрів радіосигналів, здійснити розпізнавання візуально, порівнявши їх із отриманими зображеннями наявним засобом розвідки. Основні ТТХ та призначення БпАК надають можливість попередньо оцінити загрозу, яку він становить.

У СПЗ реалізовано пошук типу БпАК за наявними даними про параметри радіоканалів із використанням відповідного пункту меню та забезпечено можливість запуску виконавчого файлу бази даних із вхідними параметрами, що передаються, із стороннього програмного забезпечення. Вікно задання вихідних даних для пошуку БпАК зображено на рис. 3а. Крім параметрів радіосигналів під час пошуку БпАК можна задати їх належність, аеродинамічну схему та призначення. Додавання та зміна даних про БпАК здійснюється у вікні редагування, що запускається з використанням відповідного пункту меню (рис. 3б).



а)



б)

Рис. 3. Модальні вікна СПЗ: а) пошуку типу БпАК за параметрами їх радіосигналів; б) додавання нових та редагування наявних даних про БпАК

Програмне забезпечення бази радіосигналів БпАК може застосовуватися разом із програмним забезпеченням технічного аналізу радіосигналів, отримуючи за вхідні дані їх оцінені параметри. У такому разі за оціненими параметрами автоматично здійснюється пошук БпАК, параметри радіосигналів яких мають близькі значення до вхідних.

Приклад комплексного використання СПЗ автоматизованого визначення модуляційних параметрів радіосигналу та розробленої бази даних для розпізнавання типу БпАК наведено на рис. 4.

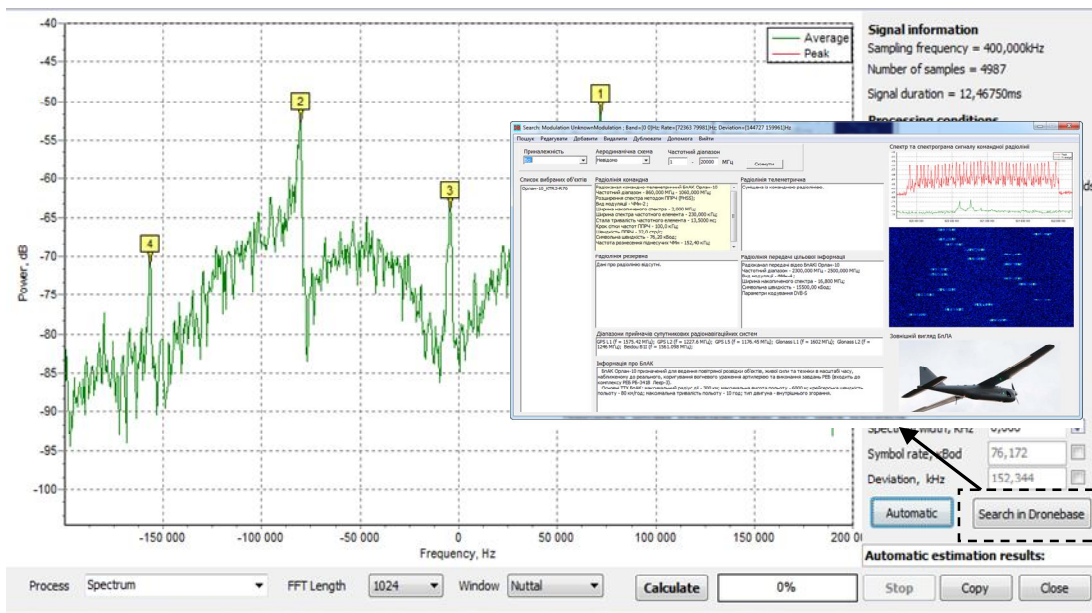


Рис. 4. Використання розробленої бази даних для розпізнавання типу БпАК

Після автоматизованого визначення модуляційних параметрів аналізованого радіосигналу (рис. 4) запускається база даних, у якій автоматично здійснюється пошук та відображається отриманий результат щодо розпізнавання типу БпАК.

**Висновки.** Запропонована структура бази даних радіосигналів БпАК побудована відповідно до принципів організації реляційних баз даних та складається з набору формально описаних таблиць, у яких зберігається інформація, що дозволяє ідентифікувати тип БпАК за параметрами та характеристиками його радіосигналів. Крім того, наявна в ній інформація додатково забезпечує планування заходів із протидії розпізаному БпАК. Розроблене програмне забезпечення бази даних дозволяє здійснювати перегляд, редагування, копіювання, додавання нової інформації про БпАК, характеристики їх радіоканалів, а також пошук та фільтрування за заданими параметрами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні структури бази даних радіосигналів БпАК, що дозволяє реалізувати автоматизоване розпізнавання його типу та планування заходів із протидії йому.

Перспективи досліджень у даному напрямку полягають в розробленні алгоритмів системи підтримки прийняття рішень, які дозволять за наявною інформацією формувати пропозиції щодо найбільш ефективної протидії виявленому БпАК, та їх інтегруванні в СПЗ запропонованої бази даних.

**СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Коршець О., Горбенко В. Уроки застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні // Повітряна міць України. 2023. № 1 (4). С. 9–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>
2. ПВП 3-00(27)253. Методичні рекомендації щодо радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам “Ланцет”. 2023. 24 с.
3. Огляд та аналіз світового досвіду боротьби з ударною безпілотною авіацією / А. Г. Єрилкін, Д. О. Гур’єв, Д. В. Карлов та ін. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 4 (49). С. 15–22. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.49.02>
4. ДСТУ 7371:2020 Техніка авіаційна державної авіації. Апарати літальні безпілотні. Основні терміни та визначення понять. Класифікація. УкрНДнц. 2021. 12 с.
5. Нагорнюк О. Методика розпізнавання типу безпілотного авіаційного комплексу за його радіосигналами // Зб. наук. праць Держ. наук.-досл. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2023. № 3 (17). С. 63–73. <https://doi:10.37701/dndivsovt.17.2023.08>
6. Liu K., Xiang X., Yin L. Radio frequency database construction and modulation recognition in wireless sensor networks // Air Force Engineering University. China. 2022. 17 p. <https://doi.org/10.3390/s22155715>
7. Stafeev D., Ronkin M. Data collection for classification of radio signals using SDR transceivers // Radioelectronics and Information Technology. 2023. P. 194–197. <https://doi:10.1109/USBREIT58508.2023.10158899>
8. DroneRF dataset: A dataset of drones for RFbased detection, classification and identification / Allahham S., Al-Sa'd M., Al-Ali A. et al. // Elsevier. 2019. 9 p. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104313>
9. Wang G., Miao H. UAV data link system: A survey // Scientific journal of intelligent systems research. 2021. Vol. 3, Iss. 11. P. 93–102.
10. On the detection of unauthorized drones – techniques and future perspectives: a review / M. Khan, H. Menouar, A. Eldeeb et al. // IEEE Sensors. 2022. Vol. 22, № 12. P. 11439–11455. <https://doi:10.1109/JSEN.2022.3171293>
11. Applications, deployments, and integration of Internet of Drones (IoD): A review / L. Abualigah, A. Diabat, P. Sumari et al. // IEEE Sensors. 2021. Vol. 21, № 22. P. 25532–25546. <https://doi:10.1109/JSEN.2021.3114266>
12. Detection, tracking, and interdiction for amateur drones / I. Guvenc, F. Koohifar, S. Singh et al. // IEEE Commun. Mag. 2018. Vol. 56, № 4. P. 75–81. <http://dx.doi.org/10.1109/mcom.2018.1700455>
13. Гайдаржи В. І., Ізварін І. В. Бази даних в інформаційних системах. Київ : УН-т “Україна”, 2018. 418 с.
14. Davidson L. Pro SQL server relational database design and implementation: best practices for scalability and performance 6th ed. Apress. 2020. 1183 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4842-6497-3>
15. Description of systems and networks in the radionavigation-satellite service (space-to-Earth and space-to-space) and technical characteristics of transmitting space stations operating in the

bands 1164–1215 MHz, 1215–1300 MHz and 1559–1610 MHz. Recommendation ITU-R M.1787-4. 2022. 56 p.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2023.

## REFERENCES

1. Korshets, O., & Horbenko, V. (2023). Uroky zastosuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ u rosiisko-ukrainskii viini [Lessons from the Use of Unmanned Aerial Vehicles in the Russian-Ukrainian War]. *Povitriana mits Ukrainy [Air Force of Ukraine]*, 1(4), 9–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17> [in Ukrainian].
2. PVP 3-00(27)253. *Metodychni rekomendatsii shchodo radioelektronnoi protydiv bezpilotnym litalnym aparatam "Lantset" [Methodical Recommendations for Radio-Electronic Countermeasures Against Unmanned Aerial Vehicles "Lancet"]*. (2023) [in Ukrainian].
3. Yerylkin, A. H., Hur'iev, D. O., Karlov, D. V., Korobetskyi, O. V., & Shevchenko, Yu. A. (2022). Ohliad ta analiz svitovoho dosvidu borotby z udarnoiu bezpilotnoiu aviatsiieiu [Review and Analysis of World Experience in Combating Strike Unmanned Aerial Vehicles]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]*, 4(49), 15–22. <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.49.02> [in Ukrainian].
4. DSTU 7371:2020 *Tekhnika aviatsiina derzhavnoi aviatsii. Aparaty litalni bezpilotni. Osnovni terminy ta vyznachennia poniat. Klasyfikatsiia [Aviation Equipment of State Aviation. Unmanned Aerial Vehicles. Basic Terms and Definitions. Classification]*. (2021). Kyiv [in Ukrainian].
5. Nahorniuk, O. (2023). *Metodyka rozpoznavannia typu bezpilotnoho aviatsiinoho kompleksu za yoho radiosygnalamy [The Method of Identifying the Type of Unmanned Aviation Complex by Its Radiosignals]*. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Scientific Publications of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification]*, 3(17), 63–73. <https://doi:10.37701/dndivsovt.17.2023.08> [in Ukrainian].
6. Liu, K., Xiang, X., & Yin, L. (2022). Radio Frequency Database Construction and Modulation Recognition in Wireless Sensor Networks. *Air Force Engineering University*. China. <https://doi.org/10.3390/s22155715>
7. Stafeev, D., & Ronkin, M. (2023). Data Collection for Classification of Radio Signals Using SDR Transceivers. *Radioelectronics and Information Technology*, 194–197. <https://doi:10.1109/USBREIT58508.2023.10158899>
8. Allahham, S., Al-Sa'd, M., Al-Ali, A., Mohamed, A., & Khattab, T. (2019). DroneRF Dataset: A Dataset of Drones for RF-based Detection, Classification and Identification. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104313>
9. Wang, G., & Miao, H. (2021). UAV Data Link System: A Survey. *Scientific Journal of Intelligent Systems Research*, Vol. 3, Iss. 11, 93–102.
10. Khan, M., Menouar, H., Eldeeb, A., Abu-Dayya, A., & Salim, F. (2022). On the Detection of Unauthorized Drones – Techniques and Future Perspectives: A Review. *IEEE Sensors*, Vol. 22, № 12, 11439–11455. <https://doi:10.1109/JSEN.2022.3171293>



11. Abualigah, L., Diabat, A., Sumari, P., & Gandomi, H. (2021). Applications, Deployments, and Integration of Internet of Drones (IoD): A Review. *IEEE Sensors*, Vol. 21, № 22, 25532–25546. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3114266>
12. Guvenc, I., Koohifar, F., Singh, S., Sichitiu, M., & Matolak, D. (2018). Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones. *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 56, № 4, 75–81. <http://dx.doi.org/10.1109/mcom.2018.1700455>
13. Haidarzhy, V. I., & Izvarin, I. V. (2018). *Bazy danykh v informatsiinykh systemakh [Databases in Information Systems]*. Kyiv [in Ukrainian].
14. Davidson, L. (2020). *Pro SQL Server Relational Database Design and Implementation: Best Practices for Scalability and Performance*. (6th ed.). Apress. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4842-6497-3>
15. *Description of Systems and Networks in the Radionavigation-Satellite Service (Space-to-Earth and Space-to-Space) and Technical Characteristics of Transmitting Space Stations Operating in the Bands 1164–1215 MHz, 1215–1300 MHz and 1559–1610 MHz. Recommendation ITU-R M.1787-4*. (2022).

**O. A. Nahorniuk**

#### **DATA BASE OF RADIO SIGNALS OF UNMANNED AVIATION COMPLEXES**

*The detection and technical analysis of the radio transmitters radiation of the unmanned aerial complexes elements allows to establish the fact of their use of and to identify type. Recognizing the type of unmanned aerial complex by their radio signals is carried out by comparing the estimated parameters of radio signals with known values stored in the database. The structure of the unmanned aerial complexes radio signal database based on the relational data model is proposed in the article. It is a set of interdependent two-dimensional tables that store information about parameters and characteristics of radio signals of control, telemetry and data radio lines, operating frequencies of receivers of the global navigation satellite systems, as well as purpose, belonging, aerodynamic scheme, appearance, main tactical and technical characteristics and recommendations for countermeasures. Information about the characteristics of unmanned aerial complex channels radio signals contains data on the frequency bands of the radio channel, spread spectrum parameters, modulation parameters, images of amplitude-frequency spectra and spectrograms. The use of the information collected in the database makes it possible to recognize the unmanned aerial complex type by its radio signals and to make a decision about the frequency bands in which the suppression of radio channel receivers, navigation equipment will be carried out, and to choose the most effective radio interference. Special software of the unmanned aerial complexes radio signal database was developed in accordance with the proposed structure. Special software allows you to view, edit, copy, add new information about unmanned aerial complexes, parameters and characteristics of their radio channels, as well as search. The special software user interface provides a simultaneous view of all information about unmanned aerial complex, parameters and characteristics of its radio signals.*

**Keywords:** database; radio signal; unmanned aircraft complex; parameter; characteristic; identification; countermeasure; special software.

Ю. І. Міхеєв, В. В. Лобода, Т. М. Войтко, Р. І. Гладич

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОШУКУ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ

*У статті розглянуто процес пошуку інформації за визначеною тематикою в мережі Інтернет. Увагу акцентовано на особливостях, які пов'язані з функціонуванням інформаційно-пошукової системи, досліджено роботу її типового зразка. Така система має забезпечувати гнучку реакцію на запит оператора шляхом інтерактивного пошуку й підтримання архіву запитів, включаючи тезаурус, засоби перевірки орфографії та пунктуації мовного запиту. Результати проведеного аналізу наявних автоматизованих систем пошуку інформації свідчать про те, що запит має формуватися з урахуванням: використання логічних зв'язків, обмежень у відстані між словами, можливості встановлення вагових коефіцієнтів ключовим словам, сортування за датою та розміром документа.*

*Запропоновано підхід до створення автоматизованої системи пошуку тематичної інформації в Інтернеті, що базується на унікальному характері оперативно-аналітичної діяльності спеціальних підрозділів, а також її структурну схему. Така система має враховувати особливості роботи різноманітних інтернет-сервісів, які використовують аналітики спеціальних служб: тематичні каталоги ресурсів, сайти новин, RSS-повідомлення та інформаційні агентства, що транслюють новини онлайн. Передбачається, що розроблення спеціального програмного забезпечення на базі запропонованої функціональної структури автоматизованої системи пошуку тематичної інформації в мережі Інтернет дозволить підвищити ефективність інформаційно-аналітичної діяльності в спеціальних підрозділах за рахунок наявності засобів: пошуку різноманітної інформації за визначеними об'єктами; виявлення зв'язків між об'єктами моніторингу та пов'язаними з ними фактами й подіями; проведення візуалізації результатів аналітичних досліджень.*

**Ключові слова:** автоматизована система; мережа Інтернет; інформаційний запит; інформаційно-пошукова система; структурна схема.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Тенденції розвитку інформаційного простору пов'язані зі збільшенням масивів даних, які циркулюють у мережі Інтернет і відрізняються за типом, формою, тематикою та є здебільшого неструктурованими. Це призводить до ускладнення швидкого та релевантного пошуку потрібної інформації за допомогою стандартних інструментів інтернет-сервісів. У таких умовах необхідно передбачати використання різних методів збору інформації, які можуть використовуватися окремо або в комплексі разом зі спеціальними системами пошуку. Особливо це стосується інформаційно-аналітичної діяльності в інтересах спеціальних підрозділів. Для якісного забезпечення їх інформаційних потреб інформаційно-аналітична діяльність має передбачати виконання комплексу таких інформаційних процесів, як: пошук, оброблення та зберігання інформації.

© Ю. І. Міхеєв, В. В. Лобода, Т. М. Войтко, Р. І. Гладич, 2023

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день для пошуку інформації в мережі Інтернет використовують індивідуальні пошукові агенти, метапошукові системи, каталоги та системи інтернет-моніторингу [1, 2]. Аналіз результатів виконання конкретного завдання щодо тематичного пошуку інформації показав, що використання зазначених засобів дещо ускладнене через їх вузьку спрямованість. У наукових працях розглядаються різні підходи до обробки текстової інформації, алгоритми формування пошукового розпорядження тощо [2–4]. Однак системний пошук інформації за визначеною тематикою не досліджувався. Це призводить до неможливості ефективного використання запропонованих підходів в інформаційно-аналітичній діяльності в умовах забезпечення максимальної повноти інформаційного масиву, автоматизації процесу збору даних та пошуку засобів навігації в ній із подальшим вилученням необхідних знань.

**Формулювання завдання дослідження.** На сьогоднішній день потребує вирішення ціла низка питань, які стосуються функціонування інформаційно-пошукових систем. Головними з них є: розробка алгоритмів і способів раціонального пошуку й подальшої обробки даних за визначеною тематикою та, як наслідок, створення на їх основі автоматизованої системи пошуку інформації (АСПІ) за запитом у мережі Інтернет. Використання розробленої системи для виконання завдань інформаційно-аналітичної діяльності дозволить скоротити час, необхідний для підготовки звітів, що забезпечить більшу ефективність пошуку та аналізу даних спеціальними підрозділами. Отже, метою статті є розгляд питання з розроблення АСПІ в мережі Інтернет.

**Виклад основного матеріалу.** Будь-який пошук інформації починається з визначення інформаційної потреби, після чого оператор повинен сформулювати пошуковий запит (рис. 1).

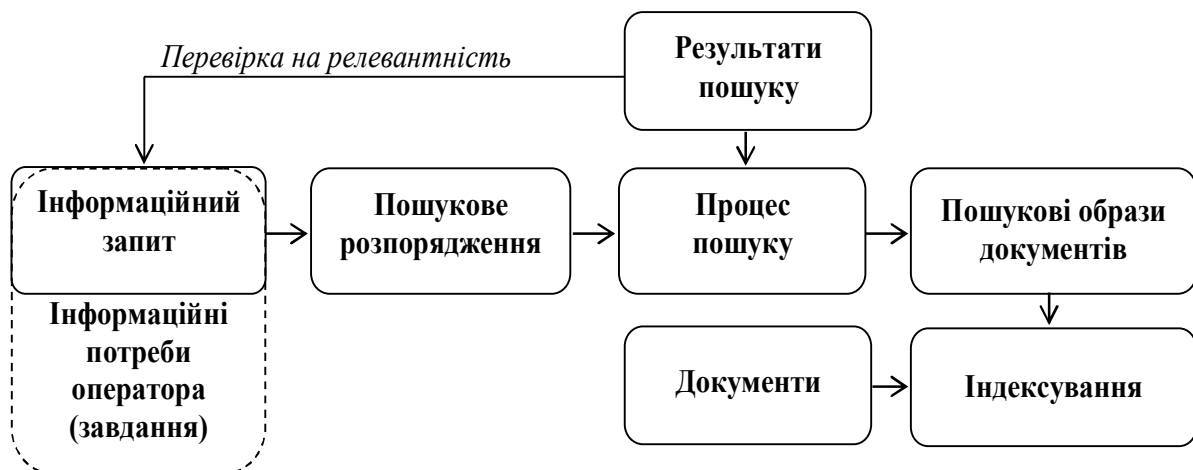


Рис. 1. Схема функціонування інформаційно-пошукової системи

Для виконання пошукового запиту, по-перше, необхідно скласти його пошуковий образ, тобто його формальне подання в термінах інформаційно-пошукової мови. Після цього складається відповідне розпорядження, яке містить у собі пошуковий образ запиту та вказівки на логічні операції, які виконуються. Далі воно порівнюється із пошуковими образами документів, у результаті отримуються відомості про адресу зберігання та

короткий зміст документа. Від того, наскільки повно буде з'ясовано завдання оператором, у подальшому залежатиме ступінь релевантності (відповідності) знайденого матеріалу змісту завдання [5].

Такий підхід до пошуку інформації відповідає векторній (лінійній) моделі, яка сьогодні застосовується в більшості відомих пошукових машин завдяки своїй простоті [4]. Для зображення цієї моделі у формалізованому вигляді використовують такі поняття, як: словник – упорядкована множина термінів потужності  $D$ ; документ (пошуковий образ документа) – двійковий вектор розмірності  $D$ ; база – матриця  $L = N \times D$ , рядки якої відповідають  $N$  документам. Якщо термін входить у документ, то у відповідному розряді вектора стоїть 1, інакше – 0. У цьому разі процедура обробки запиту набуває такого вигляду:  $Lq = r$ , де  $q$  – вектор запиту, а  $r$  – відгук системи на нього. Модель ускладнюється шляхом використання вагових коефіцієнтів у термінах документа та запиту, які відображають їх значущість. Використання вагових коефіцієнтів дозволяє визначити міру близькості “документ – запит”  $s$  як косинус кута між векторами запиту та документа:

$$s(q, d) = \frac{\sum_i q_i d_i}{\sqrt{\sum_i q_i^2 \sum_i d_i^2}}, \quad (1)$$

де  $0 \leq s(q, d) \leq 1$ ;

$q = (q_1, \dots, q_n)$  – запит,  $q_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го терміна запиту;

$d = (d_1, \dots, d_n)$  – документ,  $d_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го терміна документа.

Більш гнучку реакцію на запит оператора можна забезпечити шляхом інтерактивного пошуку. Суть такої моделі полягає у зворотному зв'язку за релевантністю. Оператору надаються початкові результати обробки знайденого, які він оцінює на відповідність. Після чого запит корегується та пошук продовжується. Крім того, АСПІ повинна підтримувати архів запитів, включати тезаурус, засоби перевірки орфографії та пунктуації. Для підвищення повноти пошуку можна використати тезаурус, у цьому разі до слів запиту додаються близькі їм відповідники із тезаурусу [3]. Це дозволить знаходити релевантні текстові фрагменти, які взагалі не місять зазначених ключових слів. Разом із цим ступінь відповідності знайденого матеріалу інформаційному запиту зменшується за рахунок наявності в Інтернеті різного виду замаскованої інформації, зміст якої не відповідає головному заголовку. Метою такої діяльності є підвищення рейтингу власників сайтів за рахунок збільшення звернень від користувачів у відповідь на сенсаційну інформацію. У результаті подібного пошуку оператор отримує великі обсяги зайвої інформації, яка не відповідає заданій тематиці. Можливим шляхом розв'язання даної проблеми є створення бази даних синонімів, яка дозволить частково автоматизувати процес формування інформаційного запиту. Крім того, АСПІ повинна самонавчатися. Зробити це можливо завдяки аналізу результату пошуку (перевірки відповідності знайденого матеріалу заданій фразі). Оператору має бути надана можливість обрати варіант пошукової фрази, яка формується з отриманого завдання-речення.

Проведений аналіз наявних АСПІ показав, що для ефективного пошуку тематичної інформації в мережі Інтернет запит повинен формуватися з урахування [6]:

можливості використання логічних зв'язків;

обмеження у відстані між ключовими словами запиту в документі;  
пошуку за визначеними полями документа;  
можливості призначення вагових коефіцієнтів словам у запиті;  
проведення сортування за датою, розміром документа тощо.

Ранжування знайдених документів повинне відбуватися на основі міри близькості “запит – документ”. Один з ефективних методів ранжування полягає в перевірці частоти появи ключового слова запиту у відповідних полях HTML-документа: <Title>, <H1...H6>, <ADDRESS>, <B>, <STRONG>. Чим ближче розташовано слово до початку документа, тим більший його ваговий коефіцієнт. Для встановлення вагових коефіцієнтів окремим пошуковим словам оцінюється їх наявність у заголовку та підзаголовку документа.

Майбутня АСПІ повинна враховувати різноманітні служби Інтернету, що привертають увагу аналітиків спеціальних служб, такі як: пошукові системи, тематичні каталоги ресурсів, сайти новин, RSS-повідомлення та інформаційні агентства, які транслюють новини онлайн. Для досягнення цієї мети першим кроком у розробці АСПІ є створення бази даних пошукових ресурсів, які доступні в Інтернеті, з урахуванням їхніх особливостей щодо надання інформації за визначеною тематикою. Для цього пропонуємо використовувати такі рубрики в базі даних (табл. 1) [7].

Таблиця 1

Рубрики бази даних пошукових ресурсів

№ з/п	Назва пошукового ресурсу	Адреса ресурсу	Рейтинг за результатами власника	Кількість запитів	Кількість знайдених посилань за запитом	Ступінь відповідності запиту (ступінь релевантності)	Частота оновлення інформації за визначеною тематикою
1	2	3	4	5	6	7	8

Уточнення пошуку можливе в разі використання тематичної класифікації ресурсів – векторів простору словника (термінів індексації) системи [8]. При цьому завдання полягатимуть у тому, щоб найкращим чином сформувавши правила та обрати такі ознаки, на основі яких буде прийматися рішення щодо віднесення ресурсу до певної рубрики. Тематичні рубрики повинні бути контекстозалежними. Використання створеної бази даних перед безпосереднім пошуком дозволить оператору сформувавши метапошуковий запит з урахуванням апріорних даних, що будуються на оцінюванні результатів пошуку з конкретного ресурсу.

Окремо розглянуто завдання щодо вилучення інформації з онлайн відеотрансляцій новин. У цьому разі для своєчасного реагування оператору необхідно постійно відслідковувати визначені завчасно передачі. Одним із можливих варіантів виконання цього завдання в умовах обмеженої кількості особового складу є здійснення запису трансляцій та формування плану їх перегляду. При цьому можна скористатися інтернет-порталами, що надають інформацію про розклад телепередач. Це дозволить автоматично обирати контент, який відповідає тематичному пошуку.

Подальша робота АСПІ пов'язана з обробкою відібраного матеріалу. Для цього необхідним етапом у ході створення майбутньої системи є організація автоматичного реферування знайденої інформації. Порядок оброблення документа складається з певних етапів (рис. 2).

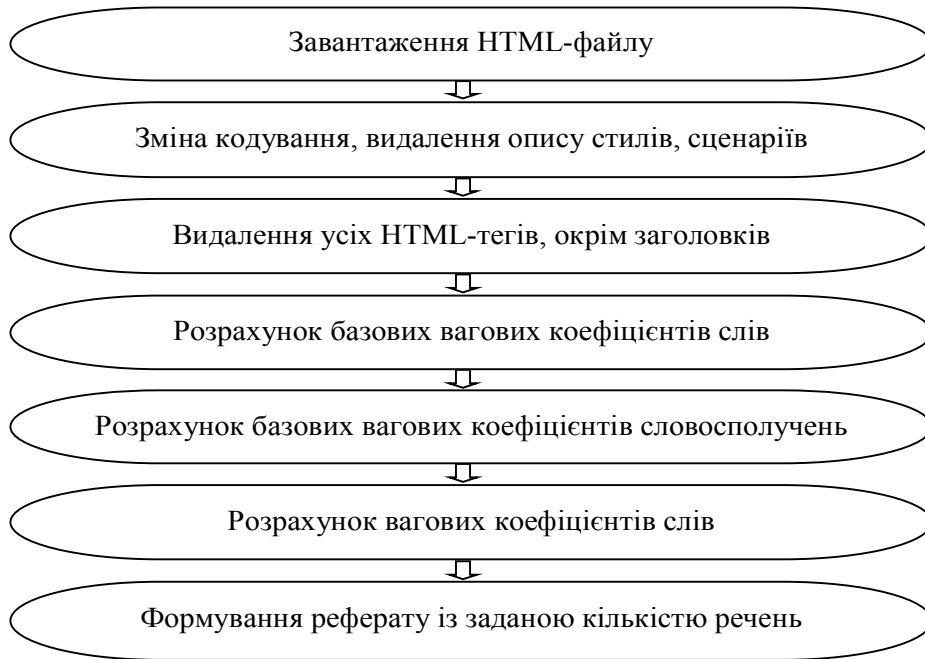


Рис. 2. Етапи автоматичного реферування документів

Для візуалізації знайденої інформації з метою її подальшого аналізу доцільно використати технологію побудови семантичних мереж [8]. Порівняння семантичних мереж різних текстів дозволяє встановити ступінь їх змістової близькості, що може використовуватися для автоматичної класифікації документів за заданими рубриками, їх пошуку за подібністю заданого тексту, а також розбиття інформаційного масиву на класи документів близького змісту. Структурна схема АСПІ за визначеною тематикою в мережі Інтернет матиме такий вигляд (рис. 3).

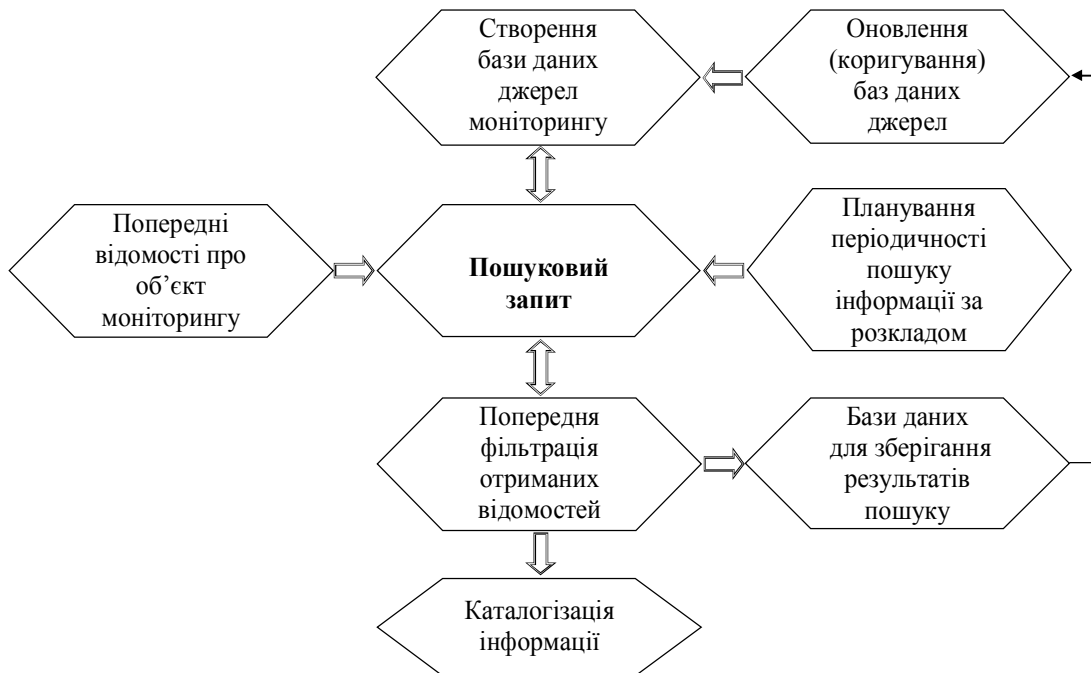


Рис. 3. Структурна схема АСПІ

**Висновки.** Реалізація процесу автоматизованого пошуку тематичної інформації в мережі Інтернет за запропонованою структурною схемою під час інформаційно-аналітичної діяльності в спеціальних підрозділах можлива шляхом:

забезпечення оператора-аналітика засобами швидкого та ефективного пошуку різномірної інформації за об'єктами моніторингу;

надання засобів швидкого виявлення неявних зв'язків між об'єктами моніторингу та пов'язаними з ними фактами й подіями;

проведення фіксації та візуалізації результатів аналітичних досліджень шляхом генерації дайджестів статей, фактів, формалізованих досьє, семантичних мереж й інших аналітичних звітів.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі полягають у розробленні архітектури відповідного спеціалізованого програмного забезпечення.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Nych L. Y., Kaminskyj R. M., & Shakhovska N. B. Effectiveness evaluation of search in information systems with consolidated information // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2016. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2016-2-13>
2. Поташова А. В. Проблеми пошуку інформації в глобальній мережі Інтернет // *Науковий огляд*. 2018. № 5 (48). С. 130–139.
3. Рогушина Ю. В. Методика розробки термінології інформаційних ресурсів як базису формування онтологій та тезаурусів для семантичного пошуку // *Інженерія програмного забезпечення*. 2014. № 1. С. 41–51. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ipz\\_2014\\_1\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ipz_2014_1_7) (дата звернення: 15.02.2023).
4. Крайовський В. Я., Литвин В. В., Шаховська Н. Б. Основні підходи до розроблення програмного комплексу автоматичного реферування текстових документів // *Зб. наук. праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*. Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2009. Вип. 51. С. 178–186.
5. Грищук Р. В., Даник Ю. Г. *Основи кібернетичної безпеки* : Монографія. Житомир : ЖНАЕУ, 2016. 549 с.
6. *Системний аналіз інформаційних процесів* : навч. посіб. / В. М. Варенко, І. В. Братусь, В. С. Дорошенко та ін. Київ : Ун-т «Україна», 2013. 203 с.
7. Міхєєв Ю. І., Чернявський Г. П., Манько О. В., Токар А. М. Контент-моніторинг у системі виявлення інформаційних небезпек // *Зб. тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф. “Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ”* (14–16 травня 2014). Львів : АСВ, 2014. С. 39.
8. Сухий О. Л., Міленін В. М., Тарадайнік В. М. *Алгоритми пошуку в інформаційних системах* : методич. рекомендації. Київ, 2015. С. 70.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2023.

### REFERENCES

1. Nych, L. Y., Kaminskyj, R. M., & Shakhovska, N. B. (2016). Effectiveness Evaluation of Search in Information Systems with Consolidated Information. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2016-2-13>

2. Potashova, A. V. (2018). Problemy poshuku informatsii v hlobalnii merezhi Internet [Problems of Information Search in the Global Internet]. *Naukovyi ohliad [Scientific Review]*, 5 (48), 130–139 [in Ukrainian].
3. Rohushyna, Yu. V. (2014). Metodyka rozrobky terminolohii informatsiinykh resursiv yak bazysu formuvannia ontolohii ta tezaurusiv dlia semantychnoho poshuku [Methodology for Developing the Terminology of Information Resources as a Basis for the Formation of Ontologies and Thesauri for Semantic Search]. *Inzheneriia prohramnoho zabezpechennia [Software Engineering]*, 1, 41–51. Retrived from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ipz\\_2014\\_1\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ipz_2014_1_7) [in Ukrainian].
4. Kraiovskiyi, V. Ya., Lytvyn, V. V., & Shakhovska, N. B. (2009). Osnovni pidkhody do rozroblennia prohramnoho kompleksu avtomatychnoho referuvannia tekstovykh dokumentiv [Basic Approaches to the Development of a Software Complex for Automatic Abstracting of Text Documents]. *Zb. nauk. prats In-tu problem modeliuvannia v enerhetytsi im. H. Ye. Pukhova NAS Ukrainy [Collection of Scientific Papers of the Pukhov Institute of Modeling Problems in Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, Iss. 51, 178–186. Kyiv [in Ukrainian].
5. Hryshchuk, R. V., & Danyk, Yu. H. (2016). *Osnovy kibernetychnoi bezpeky : Monohrafiia [Fundamentals of Cyber Security: Monograph]*. Zhytomyr [in Ukrainian].
6. Varenko, V. M., Bratus, I. V., & Doroshenko, V. S. et al. (2013). *Systemnyi analiz informatsiinykh protsesiv : navch. posib. [Systematic Analysis of Information Processes: Textbook]*. Kyiv [in Ukrainian].
7. Mikhieiev, Yu. I., Cherniavskiyi, H. P., Manko, O. V., & Tokar, A. M. (2014). Kontent-montorynh u systemi vyivlennia informatsiinykh nebezpek [Content Monitoring in the System of Detection of Information Threats]. In *Zb. tez dop. Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. "Perspektyvy rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky sukhoputnykh viisk" [Collection of Abstracts of the International Scientific and Technical Conference Prospects for the Development of Weapons and Military Equipment of the Ground Forces]*. Lviv, May14–16, 2014. (pp. 39–40). Lviv [in Ukrainian].
8. Sukhyi, O. L., Milenin, V. M., & Taradainik, V. M. (2015). *Alhorytmy poshuku v informatsiinykh systemakh : metodych. Rekomendatsii [Search Algorithms in Information Systems: Methodological Recommendations]*. Kyiv [in Ukrainian].

**Y. I. Mikhieiev, V. V. Loboda, T. M. Voitko, R. I. Hladych**

#### **AUTOMATED SYSTEM OF SEARCHING FOR INFORMATION ON INTERNET**

*In this article, author examines a process of searching for information on a particular topic on the Internet. Attention is focused on features related to functioning an information retrieval system, and the operation of its typical model is studied. Such a system should provide a flexible response to an operator's request by means an interactive search and maintenance a query archive, including a thesaurus, spelling and punctuation checkers for a language query. Results of analysis carried out on existing automated information retrieval systems indicate that a query should be formed taking into account: using logical connections, restrictions on the distance between words, the possibility of setting weighting coefficients for keywords, sorting by date and document size.*



*An approach to creating and a structural scheme of an automated system of searching for thematic information on Internet based on unique nature of operational and analytical activities of special units is proposed. Such a system should take into account particularities in operation of various Internet services used by special services analysts: thematic resource catalogs, news sites, RSS feeds and news agencies broadcasting news online. It is envisaged that development of special software based within the proposed functional structure of automatic system for searching thematic information on Internet will increase efficiency of information and analytical activities in special units due to availability of means for: searching for heterogeneous information on specific objects; identifying links between the monitored objects and related facts and events; visualization of analytical research results.*

**Keywords:** *automated system; Internet; information query; information retrieval system; structural diagram.*

**В. В. Поздняков, М. В. Бугайов****АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ**

*У роботі проаналізовано акустичні сигнали аеродинамічних засобів повітряного нападу, які застосовуються російською федерацією під час повномасштабного вторгнення. До них належать ударні безпілотні літальні апарати, крилаті ракети, реактивні та турбогвинтові літаки, гелікоптери. Встановлено, що час спостереження акустичного сигналу обмежений швидкістю засобу. Для високошвидкісних цілей (крилаті ракети, літаки) він становить у середньому 10 с, а для більш повільних – 40-50 с. Для виділення спектральних характеристик акустичних сигналів було використано метод періодограм Уелча. Показано, що акустичний сигнал засобів із повітряним гвинтом є сумою гармонічних та шумоподібних широкосмугових складових, а в оснащених турбореактивним рушієм він має переважно шумоподібну структуру з кількома вузькосмуговими компонентами. Встановлено, що в момент максимального зближення спектр сигналу має найбільшу ширину. Досліджено характерну зміну частоти гармонічних складових, що пов'язана з ефектом Доплера. Вона може бути використана для оцінювання параметрів руху та ідентифікації засобу. Шляхом кореляційного аналізу акустичних сигналів було встановлено, що широкосмугові складові мають шумоподібну структуру. Сформовано акустичний сигнал для випадку одночасного прольоту різнотипних засобів завдяки додаванню записів різних акустичних сигналів. Показано, що на частотно-часовій площині зберігаються характерні спектральні характеристики усіх об'єктів. Результати аналізу можуть бути використані для побудови математичних моделей акустичних сигналів та для розроблення методів оброблення сигналів засобів повітряного нападу у системі акустичного моніторингу повітряного простору.*

**Ключові слова:** засоби повітряного нападу; акустичний сигнал; спектрограма; система акустичного моніторингу; гармонічна складова.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** В умовах повномасштабного вторгнення російських окупаційних військ було застосовано практично всі види озброєння. Противник продовжує використовувати безпілотні та пілотовані засоби повітряного нападу (ЗПН) для завдання ударів по об'єктах військової та цивільної інфраструктури як в глибині території держави, так і в прикордонних та прифронтових районах. Дефіцит радіолокаційних станцій, характерні для них обмеження щодо виявлення літальних апаратів на низьких та гранично низьких висотах, розділення групових цілей, зумовлюють необхідність розвитку альтернативних способів виявлення та ідентифікації ЗПН.

Одним із варіантів вирішення даної проблеми є нарощування спроможностей системи акустичного моніторингу повітряного простору. Разом із притаманними даному підходу недоліками (невелика дальність дії, невисока точність визначення координат) акустичні датчики працюють у пасивному режимі, що унеможлиблює визначення їх

© В. В. Поздняков, М. В. Бугайов, 2023

місцеположення, вони не потребують прямої видимості на ціль та стійкі до впливу засобів радіоелектронної боротьби.

Тому вдосконалення математичного забезпечення для оброблення сигналів є актуальним напрямком розвитку системи акустичного моніторингу повітряного простору. Аналіз структури акустичних сигналів, встановлення їх характерних ознак дозволить побудувати математичну модель та алгоритми виявлення й розділення акустичних сигналів ЗПН, а також визначення параметрів їх руху. Отримані дані можуть бути використані для формування та передачі цілевказівок для засобів протиповітряної оборони та радіоелектронної боротьби, а також зможуть підвищити інформативність системи протиповітряної оборони держави в цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх десятиліть велика кількість робіт як вітчизняних [1–3], так і закордонних дослідників [4–7] були присвячені вивченню характеристик акустичного випромінювання безпілотних літальних апаратів (БпЛА). У цих дослідженнях проведено велику кількість лабораторних та польових експериментів із відтворенням різних умов розповсюдження акустичних хвиль та режимів польоту БпЛА. Для аналізу сигналів використовувалося їх подання в частотній або в частотно-часовій областях. Запропоновано значну кількість методів акустичного виявлення та оцінювання координат БпЛА. Основні зусилля в наведених роботах зосереджено на формулюванні пропозицій щодо побудови систем акустичного моніторингу для охорони периметра важливих об'єктів державної інфраструктури та приватної власності. Не припиняються також дослідження акустичного шуму великої авіації [8, 9]. Основний напрямок – дослідження джерел утворення потужного акустичного шуму, його вплив на населення та навколишнє середовище з екологічної точки зору в районах навколо аеропортів.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою дослідження є виділення характерних ознак акустичних сигналів ЗПН шляхом аналізу їх часових реалізацій, а також із використанням спектрального та кореляційного аналізу для подальшого розроблення математичних моделей цих сигналів та методів і алгоритмів їх оброблення.

### **Виклад основного матеріалу**

#### *Аналіз процесу утворення акустичних сигналів ЗПН*

Завданням системи акустичного моніторингу повітряного простору є виявлення, ідентифікація та визначення місцеположення безпілотних та пілотованих аеродинамічних ЗПН за їх акустичними сигналами. До аеродинамічних ЗПН належать крилаті ракети (КР), БпЛА, літаки та гелікоптери. Акустичний сигнал кожного з них має свої характерні особливості, використовуючи які можна їх виявити та ідентифікувати. Залежно від місця встановлення акустичного датчика шуми, які перешкоджають його роботі, можуть бути як природного походження (вітер, дощ, інші звуки), так і техногенного характеру (промисловий та транспортний шум).

Визначальним найпотужнішим джерелом акустичного сигналу аеродинамічних ЗПН є їхній двигун. Залежно від їх типу він може бути різної конструкції та принципу дії. Ударні БпЛА Shahed-136, які застосовуються агресором, оснащені поршневіми двигунами внутрішнього згорання, більшість КР та літаків – двоконтурними турбореактивними

(турбовентиляторними), а деякі великі транспортні літаки та стратегічні бомбардувальники-ракетоносці – турбогвинтовими. На гелікоптерах встановлені газотурбінні двигуни. У шумові кожного із них є характерні особливості, використовуючи які можна виявити та ідентифікувати конкретний тип ЗПН.

Під час роботи поршневого двигуна відпрацьовані гази з високою температурою та тиском періодично випускаються в атмосферу. Кінетична енергія їх потоку збуджує навколишнє середовище, породжуючи в ньому звукові коливання імпульсного характеру певної частоти. Частота збурень пов'язана з частотою обертання колінчастого валу. Рух металевих частин і механізмів всередині двигуна породжує високо- і низькочастотний широкосмуговий шум, проте його потужність є набагато нижчою від потужності вихлопу.

Звук, який генерується двоконтурним турбореактивним двигуном, має складну багатокомпонентну структуру. Його можна розділити на три основні складові: шум реактивного струменя, коли високошвидкісний потік газів із сопла двигуна, змішуючись із навколишнім повітрям, створює турбулентність, що є потужним джерелом широкосмугового звукового випромінювання; шум камери згорання, спричинений швидким окисненням упорскуваного пального та пов'язаним із цим виділенням енергії; шум турбомашини, утворений вентилятором і лопатками компресорних та турбінних коліс [9].

У ЗПН, рушієм яких є повітряний гвинт, він також є джерелом акустичного сигналу. У структурі його шуму виділяють широкосмугову й гармонічну складові. Широкосмугова характеризується вихровим шумом, викликаним зривом вихорів із заднього ребра лопаті. Вихровий шум, утворений у результаті обтікання потоком лопаті гвинта, має суцільний спектр, оскільки перерізи лопаті обтікаються з різними швидкостями, залежно від радіуса і, крім того, циркуляція за довжиною лопаті змінна. Із кожної лопаті сходять суцільна безперервна за радіусом вихрова завеса – і звук випромінюється безперервно. Гармонічна складова характеризується шумом обертання, який, у свою чергу, поділяють на дві компоненти: одна з них обумовлена впливом на середовище стаціонарних аеродинамічних навантажень (сил тяги і моменту на валу гвинта); друга пов'язана з кінцевою товщиною лопаті, яка під час обертання витісняє з навколишнього середовища такий об'єм, що дорівнює власному, який потім знову заповнюється середовищем. Відбувається періодична зміна об'єму в будь-якій фіксованій точці простору, що знаходиться в межах гвинта. Тобто елементарні об'єми в кожній точці простору в межах диска гвинта пульсують із тією ж частотою, що і частота шуму обертання в разі впливу на середовище сталих аеродинамічних навантажень на лопаті. Інтенсивність об'ємного шуму залежить від товщини профілю лопатей та їх відносної швидкості [10].

Під час польоту ЗПН також виникає широкосмуговий низькочастотний аеродинамічний шум, зумовлений швидким рухом повітря навколо частин його корпусу. Основний вклад у разі утворення такого шуму здійснюють елементи, які забезпечують підйомну силу та управління засобом (поверхня крила, закрилки, хвостове оперення тощо) [9]. Даний тип шуму зростає під час збільшення швидкості ЗПН або зменшення висоти польоту через зростання щільності повітря.

#### *Частотно-часовий аналіз акустичних сигналів БпЛА Shahed-136*

На БпЛА Shahed-136 встановлено клон авіаційного двигуна німецької компанії Limbach 550. Це двотактний 4-циліндровий поршневий опозитний двигун повітряного охолодження. У ньому на кожний оберт колінчастого валу відбувається два такти вихлопу

в протилежній парі циліндрів. Розглянемо графік співвідношення потужності та крутного моменту даного двигуна (рис. 1) [11]. Максимальне значення крутного моменту знаходиться в проміжку між 5750 та 7250 об/хв. Тобто значення робочих обертів у крейсерському режимі польоту лежить у нижній частині цього діапазону, близько 6000 об/хв, що відповідає частоті вихлопу двигуна близько 200 Гц. Гвинт БПЛА Shahed-136 має дві лопаті, тому частота звукових збурень, утворених ним, дорівнює подвоєній частоті обертання ротора двигуна, тобто збігається з частотою його вихлопу. Отже, до точки спостереження будуть доходити звукові хвилі, що є суперпозицією гармонічних дискретних шумів, а також широкосмугових високо- та низькочастотних аеродинамічних шумів.

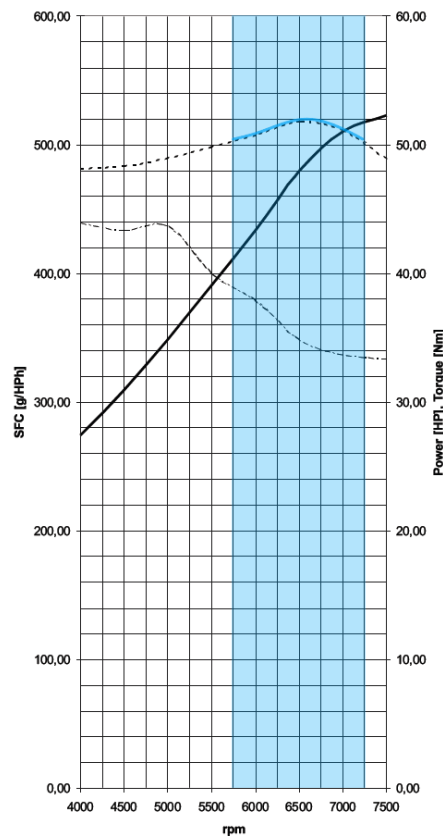


Рис. 1. Графік розподілу потужності, крутного моменту та питомої витрати пального двигуна Limbach 550

Візуалізація та аналіз записів акустичних сигналів ЗПН проводилися із використанням інструментів пакетів numpy та scipy мови програмування Python. На рис. 2 показано часову реалізацію акустичного сигналу БПЛА Shahed-136 під час польоту біля спостерігача, що відображає залежність рівня сигналу від часу. Із цього рисунку видно, що в першій половині запису, коли БПЛА знаходиться на значній відстані, амплітуда сигналу розподілена загалом рівномірно. У другій половині під час підльоту БПЛА до точки максимального зближення амплітуда сигналу наростає швидше, ніж спадає в разі віддалення. Протягом усього часу спостереження вона має короткочасні провали та сплески потужності, пов'язані із впливом поривів вітру на розповсюдження акустичних хвиль. Час реєстрації сигналу становить близько 20 секунд.

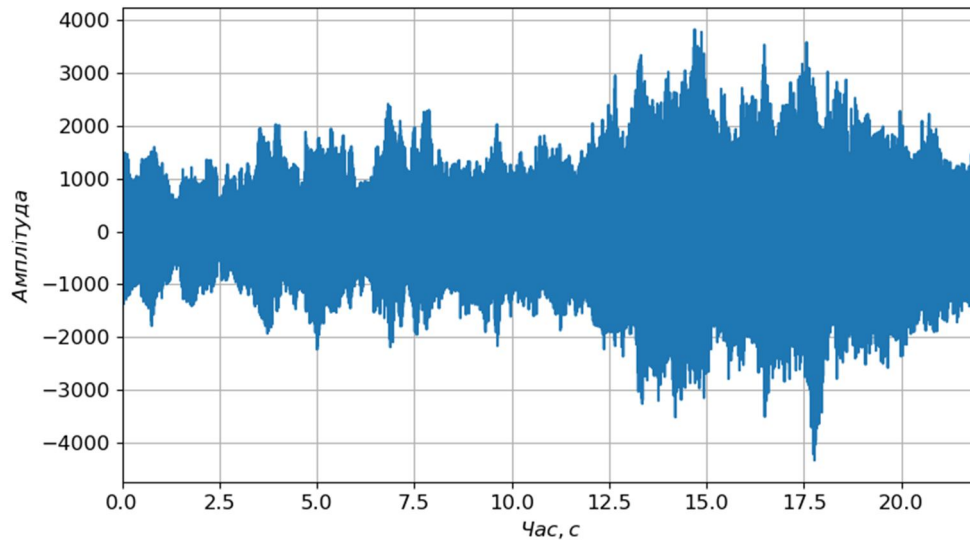


Рис. 2. Залежність рівня акустичного сигналу БпЛА Shahed-136 від часу

На рис. 3 зображено графік розподілу спектральної щільності потужності (СЩП) акустичного сигналу БпЛА Shahed-136, отриманий шляхом розрахунку періодограми Уелча. Розрахуємо вибіркового спектра зваженого  $w$  в вікні  $j$ -го сегмента сигналу  $x$ :

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

де  $N_{FFT}$  – довжина вікна швидкого перетворення Фур'є.

Накопичення  $M$  вибіркового енергетичних спектрів дасть оцінку СЩП

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

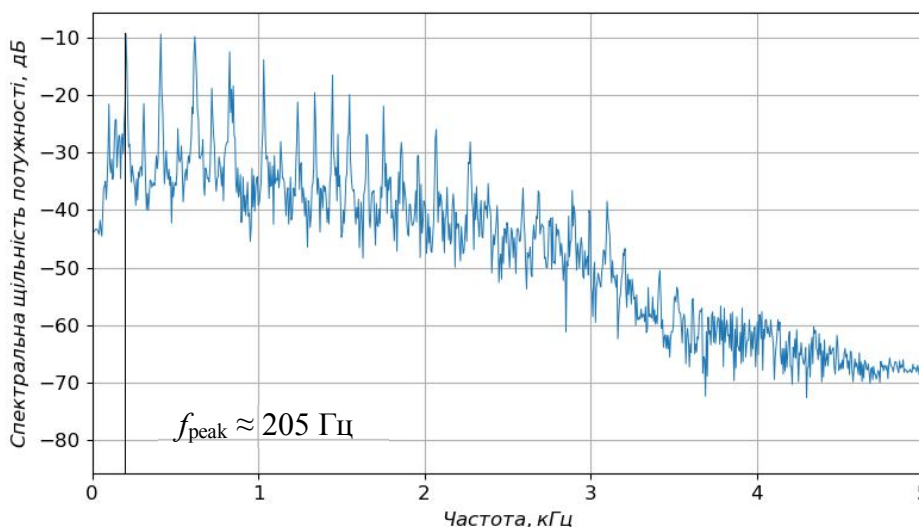


Рис. 3. Спектральна щільність потужності акустичного сигналу БпЛА Shahed-136

На графіку чітко простежується багатокомпонентна гармонічна структура акустичного сигналу. Частота першої гармоніки становить близько 205 Гц, що відповідає частоті вихлопу двигуна та звуку, який генерується повітряним гвинтом. Амплітуда гармонік швидко знижується зі зростанням частоти. У всій смузі частот спостерігається наявність широкосмугової шумоподібної складової. Енергія сигналу зосереджена в смузі частот 130–2600 Гц. Потужність високочастотних складових на 10–25 дБ менша, ніж низькочастотних.

На рис. 4 наведено спектрограму акустичного сигналу БпЛА Shahed-136 під час прольоту поблизу спостерігача. Смуга частот, яку займає акустичний сигнал, та насиченість спектра гармоніками змінюється під час переміщення БпЛА відносно точки спостереження. У разі наближення ширина спектра сигналу збільшується, а кількість гармонічних складових зростає та є максимальною за їх максимального зближення. У разі віддалення спостерігається зворотний ефект. Це пояснюється більш швидким затуханням високочастотних складових під час розповсюдження в атмосфері [12]. Також можемо спостерігати зміну частоти акустичного сигналу під час прольоту БпЛА за рахунок ефекту Доплера. Аналізуючи частотний зсув, можна оцінити параметри руху ЗПН [13].

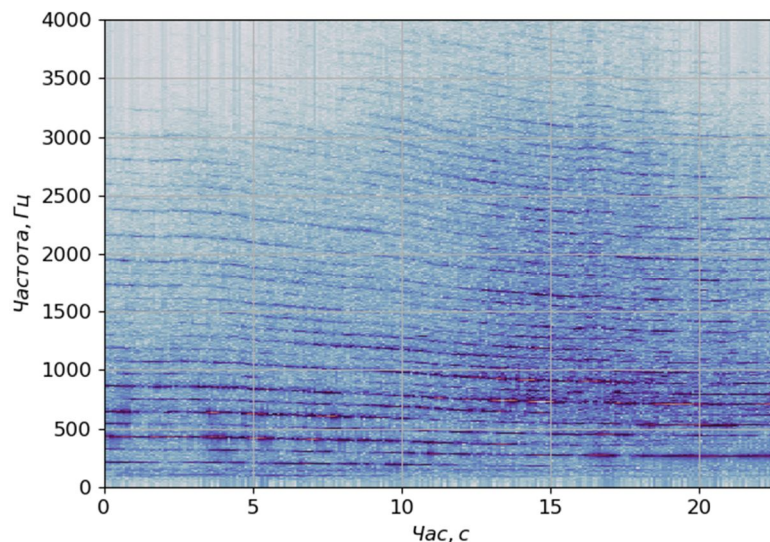


Рис. 4. Спектрограма акустичного сигналу БпЛА Shahed-136

Для оцінювання кореляційних характеристик акустичних сигналів будемо використовувати автокореляційну функцію (АКФ), її значення для  $m$ -го часового зсуву розраховуватимемо за таким виразом:

$$r[m] = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x[n]x[n+m], \quad (3)$$

де  $L$  – довжина вікна аналізу.

Значення часового зсуву змінюються в інтервалі  $[-L+1, L-1]$ . Перед розрахунком АКФ значення множників, що входять під знак суми, повинні бути центровані. Для нульового часового зсуву значення АКФ дорівнюватиме енергії сигналу. Характерна форма АКФ акустичного сигналу (рис. 5) вказує на його насиченість гармонічними складовими.

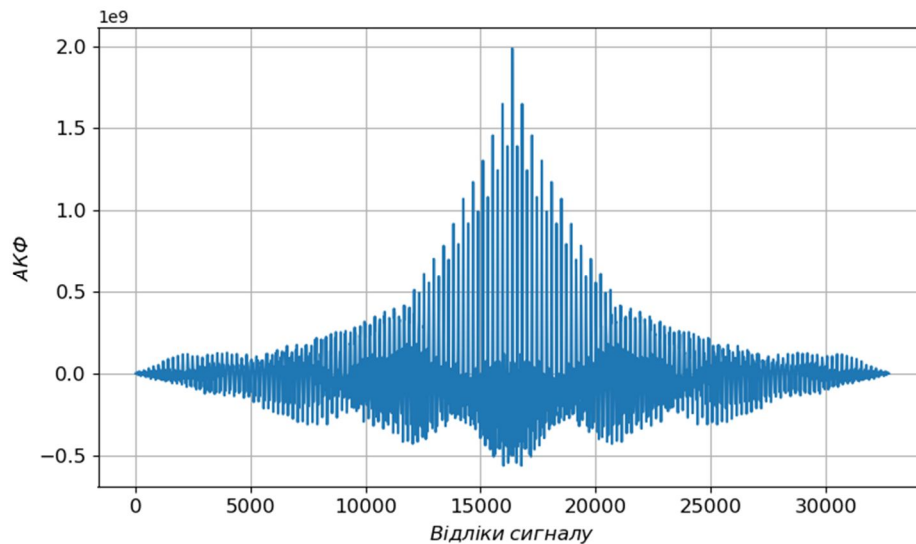


Рис. 5. АКФ акустичного сигналу БпЛА Shahed-136

Аналіз записів акустичних сигналів БпЛА Shahed-136, записаних у різних умовах навколишнього середовища, на різній відстані та ділянках траєкторії польоту відносно точки спостереження, дозволяє зробити висновок, що їх характерними ознаками є:

- чітка гармонічна структура сигналу з піками на кратних частотах;
- потужність і насиченість сигналу гармонічними складовими збільшується в разі зближення БпЛА з точкою спостереження;
- ширина спектра сигналу залежить від відстані між БпЛА та точкою спостереження;
- спостерігається зсув частоти, зумовлений ефектом Доплера;
- амплітуда прийнятого сигналу залежить від напрямку та сили вітру.

#### *Частотно-часовий аналіз акустичних сигналів КР*

Аналіз застосування противником КР показує, що найчастіше використовуються такі типи ракет: ЗМ-14 “Калібр”, Х-101, Х-555, Х-55, Х-59, П-800 “Онікс”, Х-22. Серед них є як сучасні, так і радянські розробки. На більшості сучасних КР російського виробництва встановлюють маршові турбореактивні двигуни ТРДД-50Б та Р95-300.

Маршовий двигун ТРДД-50Б – малогабаритний турбореактивний двоконтурний двигун одноразового застосування, призначений для встановлення на дозвукові літальні апарати, уніфікований для усіх ракет комплексів “Калібр”.

Маршовий двигун Р95-300 – короткоресурсний двоконтурний одновальний турбореактивний двигун із кільцевою камерою згорання, призначений для встановлення на дозвукові літальні апарати, ракетні комплекси Х-101 та Х-555.

Більшість шумів двигуна КР зумовлена реактивним струменем. Високошвидкісний потік газів із сопла двигуна нестійкий, він створює турбулентність, що є потужним джерелом ширококутового звукового випромінювання. Вентилятор, компресор та турбіна мають велику кількість лопаток і створюють як ширококутові, так і гармонічні складові акустичного сигналу. Також під час польоту КР виникає ширококутовий аеродинамічний шум, зумовлений швидким обтіканням повітря її корпусу, крил та оперення.

На рис. 6 показано часову реалізацію акустичного сигналу КР, що відображає залежність його рівня від часу. Із цього рисунку видно, що амплітуда акустичного сигналу ракети в разі наближення до точки спостереження наростає швидше, ніж спадає під час



віддалення. Вузькосмугові складові найбільше проявляються в середній частині сигналу, що відповідає максимальному зближенню КР. У кінцевій частині сигналу спостерігається зменшення амплітуд як низькочастотних широкосмугових складових, так і вузькосмугових. Обвідна сигналу порізана, має короткочасні сплески та провали, час його реєстрації зазвичай не перевищує 10 с, що зумовлено високою швидкістю прольоту КР.

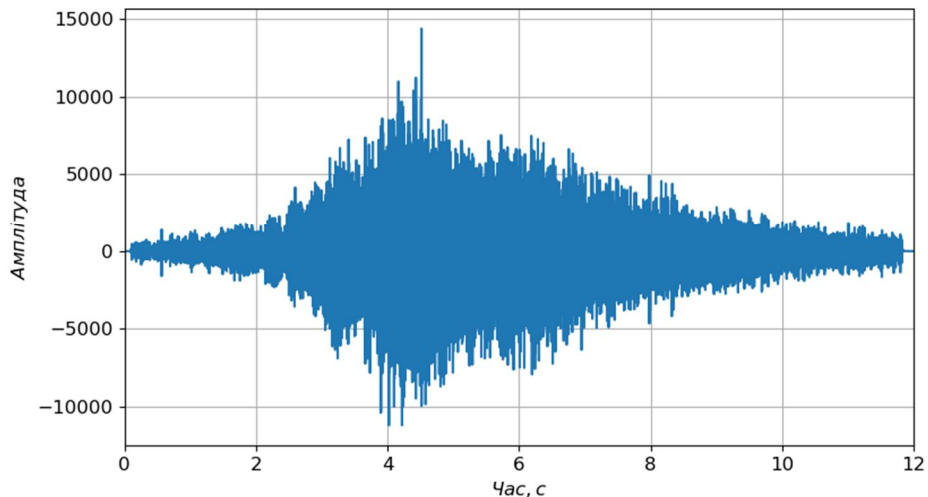


Рис. 6. Залежність рівня акустичного сигналу КР від часу

Розподіл СЦП акустичного сигналу КР зображено на рис. 7, з нього випливає, що потужність широкосмугових складових сигналу знижується зі зростанням частоти. Гармонічні складові, пов'язані з обертанням лопаток вентилятора, компресора та турбіни, мають декілька піків на частоті близько 6,3 кГц, їх можна почути як характерний свист, яким супроводжується політ КР. Потужність широкосмугових високочастотних складових на 20–35 дБ менша, ніж потужність низькочастотних. Смуга акустичного сигналу становить 90–3200 Гц. Аналіз записів акустичних сигналів КР показав, що верхня частота дуже залежить від потужності прийнятого сигналу, тобто від дальності до ЗПН. Вона може приймати значення в діапазоні 3–8 кГц у момент максимальної потужності зафіксованого сигналу.

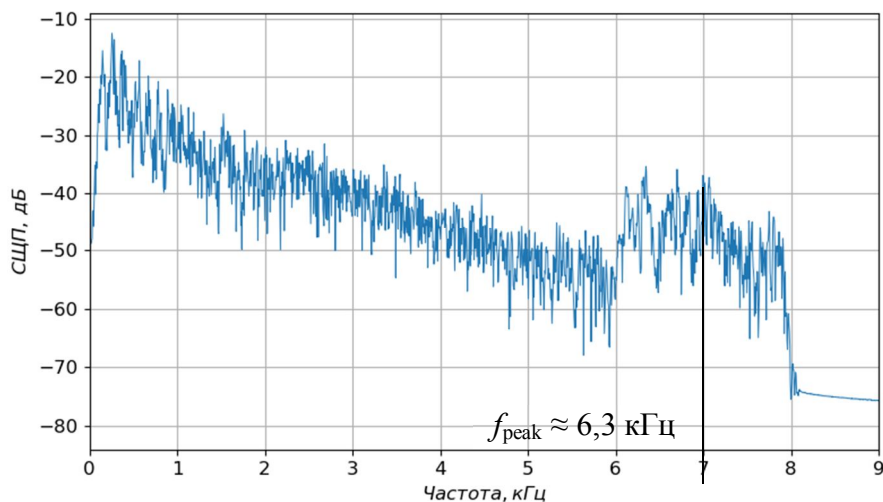


Рис. 7. СЦП акустичного сигналу КР

На рис. 8 наведено спектрограму акустичного сигналу КР, записаного під час прольоту поблизу спостерігача. У разі наближення КР до точки спостереження ширина та насиченість спектра сигналу збільшуються та є максимальними за їх максимального зближення. Під час віддалення спостерігається зворотний ефект, причому звуження спектра відбувається за рахунок зниження максимальної частоти, що пояснюється більшим затуханням високочастотних складових в атмосфері.

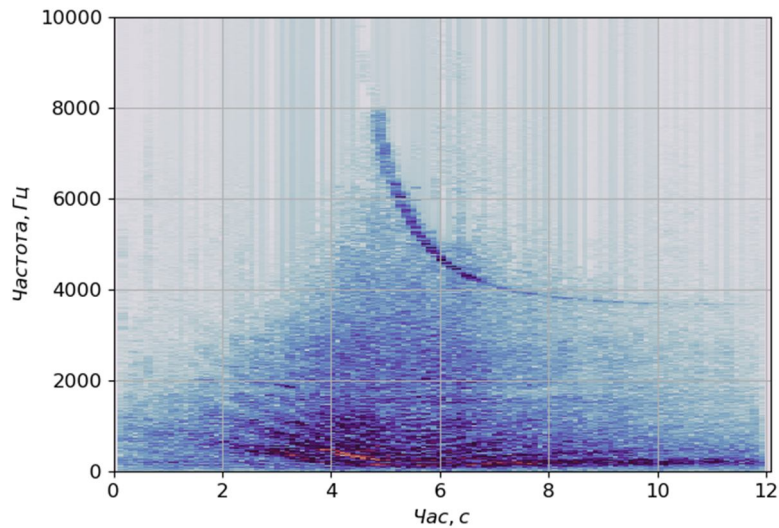


Рис. 8. Спектрограма акустичного сигналу КР із двигуном типу ТРДД-50

Також можемо спостерігати зміну частоти акустичного сигналу під час прольоту КР за рахунок ефекту Доплера. Аналізуючи розмах частоти Доплера, можна оцінити радіальну швидкість КР відносно точки спостереження.

З графіка АКФ акустичного сигналу КР (рис. 9) випливає, що він має шумоподібну структуру з кількома гармонічними складовими.

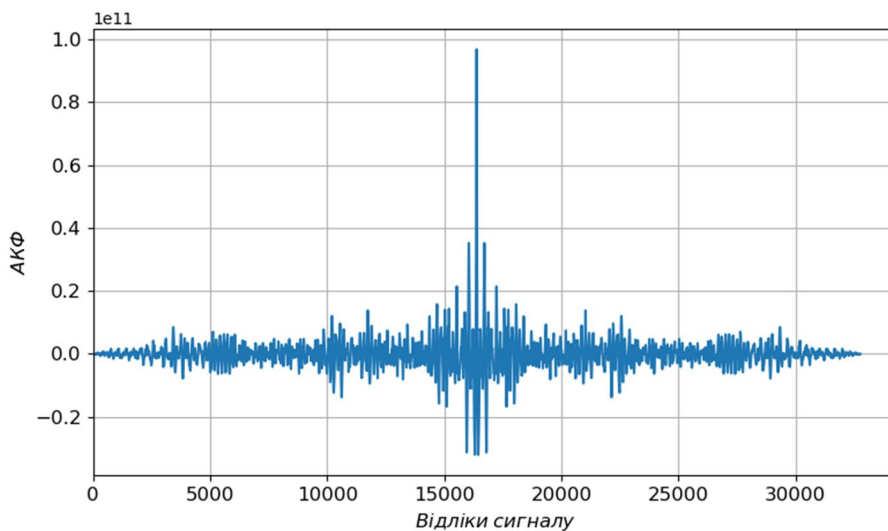


Рис. 9. АКФ акустичного сигналу КР

На рис. 10 зображено спектрограми акустичних сигналів інших КР. На всіх графіках простежуються аналогічні особливості: час реєстрації сигналу до 10 с, насичений зашумлений спектр сигналу та наявність декількох вузькосмугових складових.

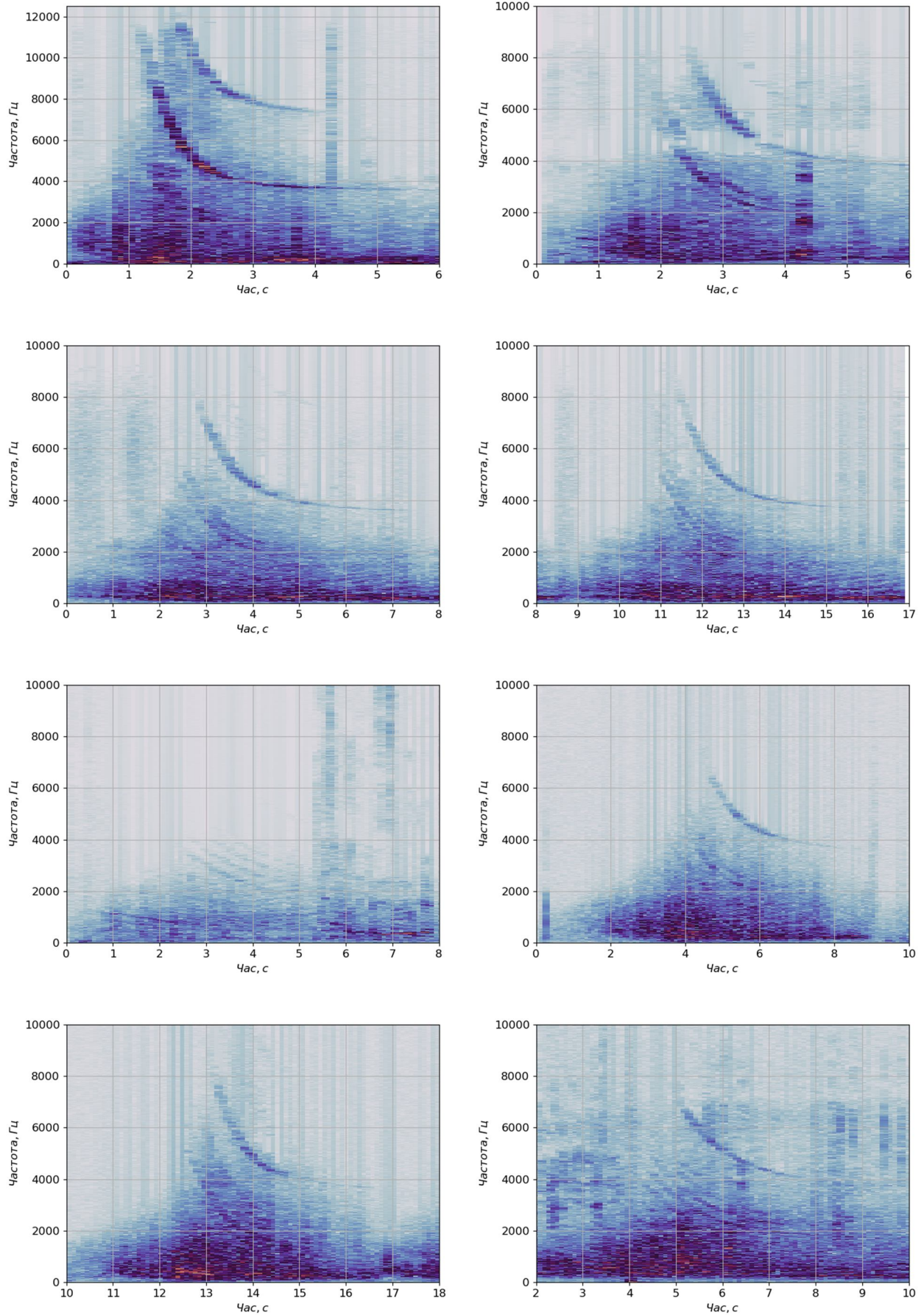


Рис. 10. Спектрограми акустичних сигналів КР

Характерне розміщення вузькосмугових складових на частотно-часовій площині може бути відмінною ознакою для виявлення та розпізнавання такого типу ЗПН. Виходячи з проведеного аналізу, до характерних ознак акустичних сигналів КР можна віднести такі:

- невелику тривалість зареєстрованого сигналу;
- шумоподібну структуру сигналу з кількома частотно-модульованими складовими;
- імпульсну форму обвідної сигналу зі згладженими краями;
- розмах і швидкість зміни частоти Доплера;
- швидкість зміни ширини спектра сигналу;
- швидкість зміни потужності сигналу.

Через високу швидкість руху КР швидкість зміни наведених параметрів також буде високою. Використовуючи дану ознаку, можна забезпечити надійне розпізнавання акустичних сигналів КР.

*Частотно-часовий аналіз акустичних сигналів реактивного, турбогвинтового літаків та гелікоптера*

Основним джерелом шуму реактивного надзвукового літака є двигун. Проте з огляду на площу поверхні елементів корпусу літака, які забезпечують підйомну силу, низькочастотна широкосмугова складова має значно більшу потужність. Такі літаки оснащені двоконтурними турбореактивними двигунами, які мають низький ступінь двоконтурності, тому тональний шум вентилятора, який ми можемо почути як характерний свист, проявляється значно менше, ніж у КР та пасажирських літаків з дозвуковими швидкостями польоту. Крім того, відмінності акустичного сигналу реактивного літака від сигналу КР спричинені ще декількома факторами. Реактивний літак у польоті може динамічно маневрувати, змінюючи висоту, напрям та швидкість, що не притаманно для польоту КР. Ці фактори впливають на час реєстрації та потужність зафіксованого акустичного сигналу.

На рис. 11 показані залежності, які характеризують параметри акустичного сигналу пролітаючого реактивного літака. Час реєстрації сигналу становить близько 6 с. У цьому разі потужність сигналу за наближення та віддалення літака змінюється майже симетрично. Проте аналіз набору записів показав, що в більшості випадків сигнали мають таку ж характеристику, як і в КР, швидкий приріст і плавний спад амплітуди. Вузькосмугові складові проявляються більше в момент піка потужності сигналу. Сигнал має шумоподібну структуру з декількома вузькосмуговими піками. Його смуга становить 30–6900 Гц. Залежно від потужності записаних сигналів значення верхньої частоти змінюється в діапазоні 6–14 кГц.

На спектрограмі акустичного сигналу реактивного літака чітко простежується вузькосмугова складова, яка має характерний вигляд, спричинений ефектом Доплера. Графік АКФ вказує на шумоподібну структуру сигналу з кількома гармонічними складовими.

Спектрограми інших записів акустичних сигналів реактивних літаків, зображені на рис. 12, показують, що в деяких випадках час реєстрації сигналу становить одиниці секунд і в таких сигналах вузькосмугова складова виражена слабо або зовсім не проявляється.

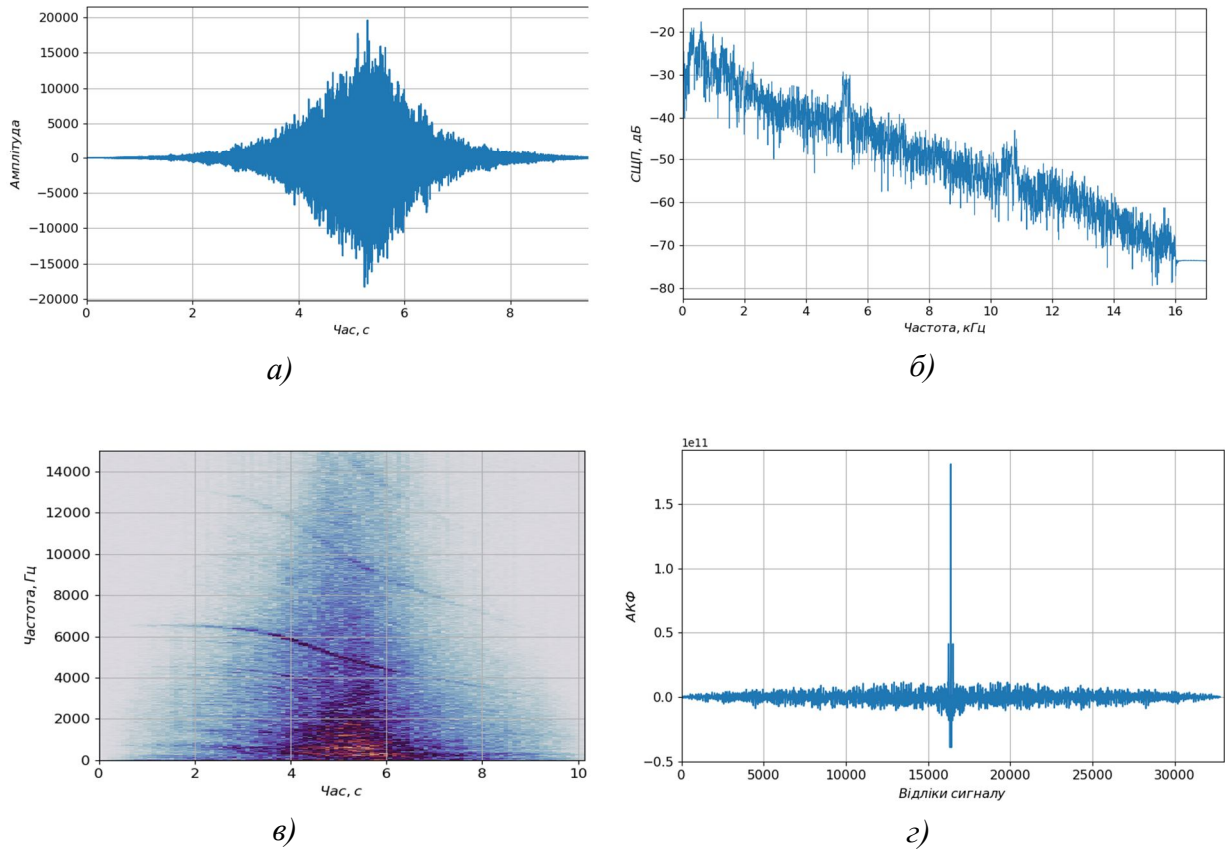


Рис. 11. Графіки залежностей параметрів акустичного сигналу реактивного літака:  
 а) амплітуда; б) СЦП; в) спектрограма; г) АКФ

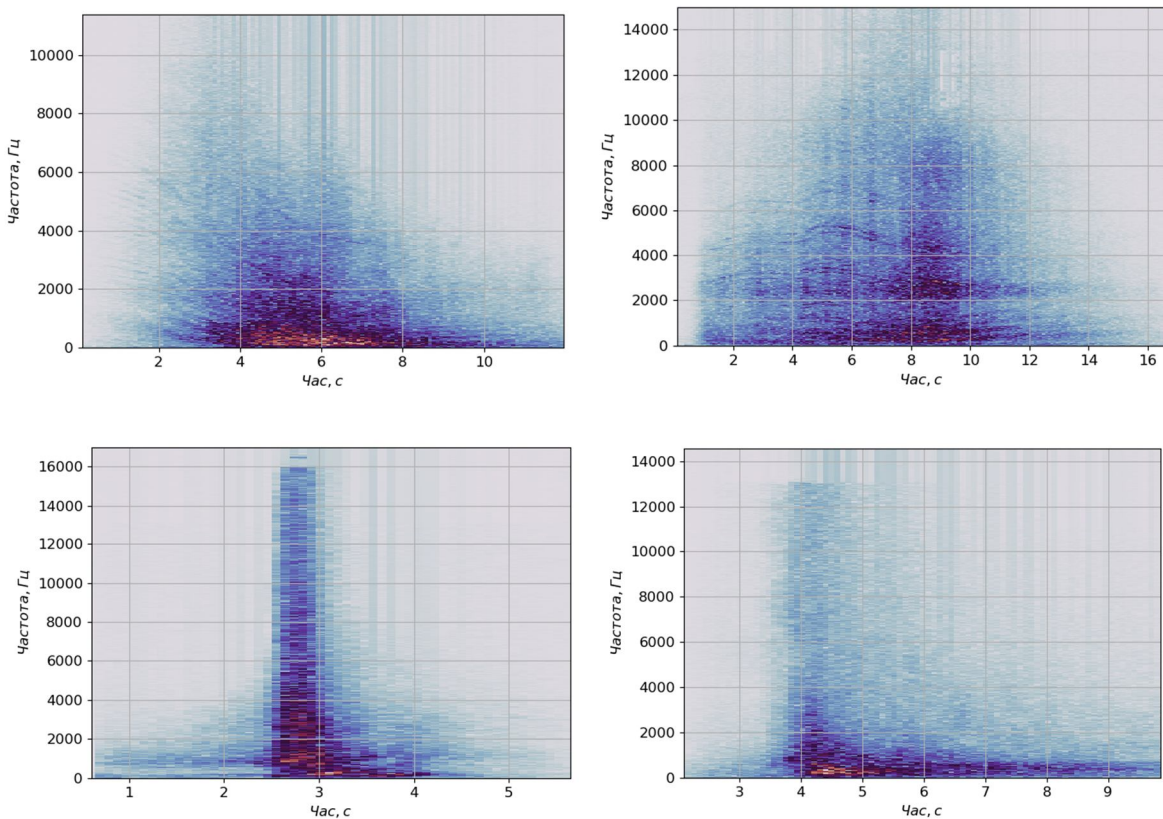


Рис. 12. Спектрограми акустичних сигналів реактивних літаків

Акустичний сигнал літака, оснащеного турбогвинтовими силовими установками, має характеристики, притаманні ЗПН як з турбореактивним рушієм, так і з повітряним гвинтом. На рис. 13 показані залежності, які описують акустичний сигнал стратегічного бомбардувальника-ракетоносця ТУ-95, що пролітає. Цей літак приводиться в рух чотирма турбореактивними двигунами, на кожному з яких встановлено по два гвинти, які мають по чотири лопаті та обертаються в протилежних напрямках.

Час реєстрації сигналу становить десятки секунд, що вказує на його високу потужність та відносно невелику швидкість такого типу ЗПН. Характер зміни амплітуди аналогічний попереднім, спад відбувається плавніше. Обвідна сигналу має імпульсний характер. У діапазоні частот до 750 Гц спостерігаються потужні гармонічні піки, потужність яких на 5–10 дБ вища за рівень широкопasmової складової. Смуга сигналу становить 95–950 Гц. На спектрограмі чітко видно його гармонічну структуру та зсув частоти внаслідок ефекту Доплера. Форма АКФ вказує на насиченість сигналу гармонічними складовими.

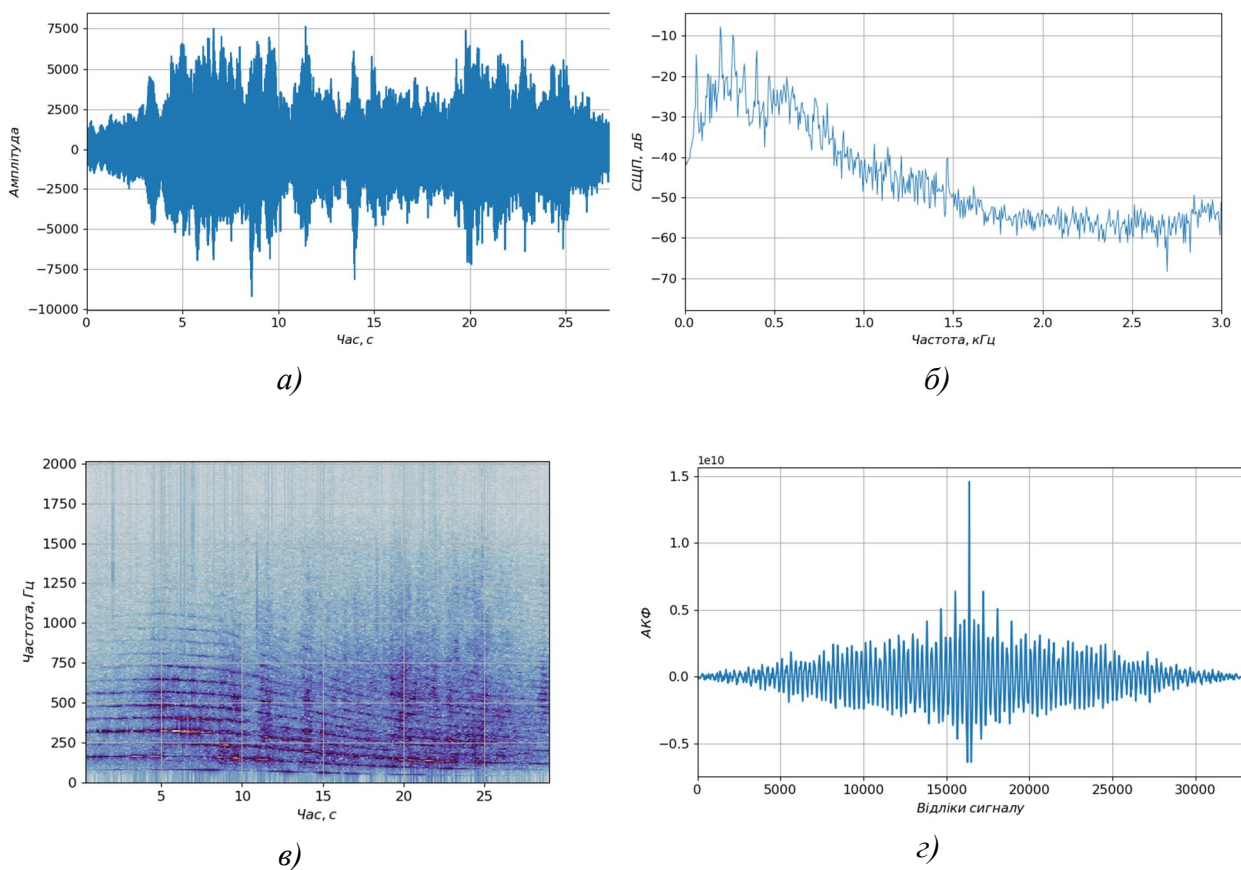


Рис. 13. Графіки залежностей параметрів акустичного сигналу турбогвинтового літака: а) амплітуда; б) СШП; в) спектрограма; г) АКФ

Акустичний сигнал гелікоптера включає три складові: шум несучого гвинта, найбільш потужний, з частотою від 10 до 30 Гц; шум хвостового гвинта з частотою близько 100 Гц; шум турбіни двигуна та трансмісії (зосереджений на частотах кілька кілогерц) [4].

На рис. 14 показано графіки параметрів акустичного сигналу гелікоптера МІ-24, що пролітає. Протягом всього часу реєстрації сигналу проявляються піки гармонічних складових. Смуга сигналу становить 30–3050 Гц. Спектр сигналу насичений гармоніками.

Потужність знижується зі зростанням частоти, на верхніх частотах смуги сигналу вона на 30 дБ нижча. На спектрограмі добре проявляється вузькосмугова складова, спричинена високочастотним шумом турбіни двигуна.

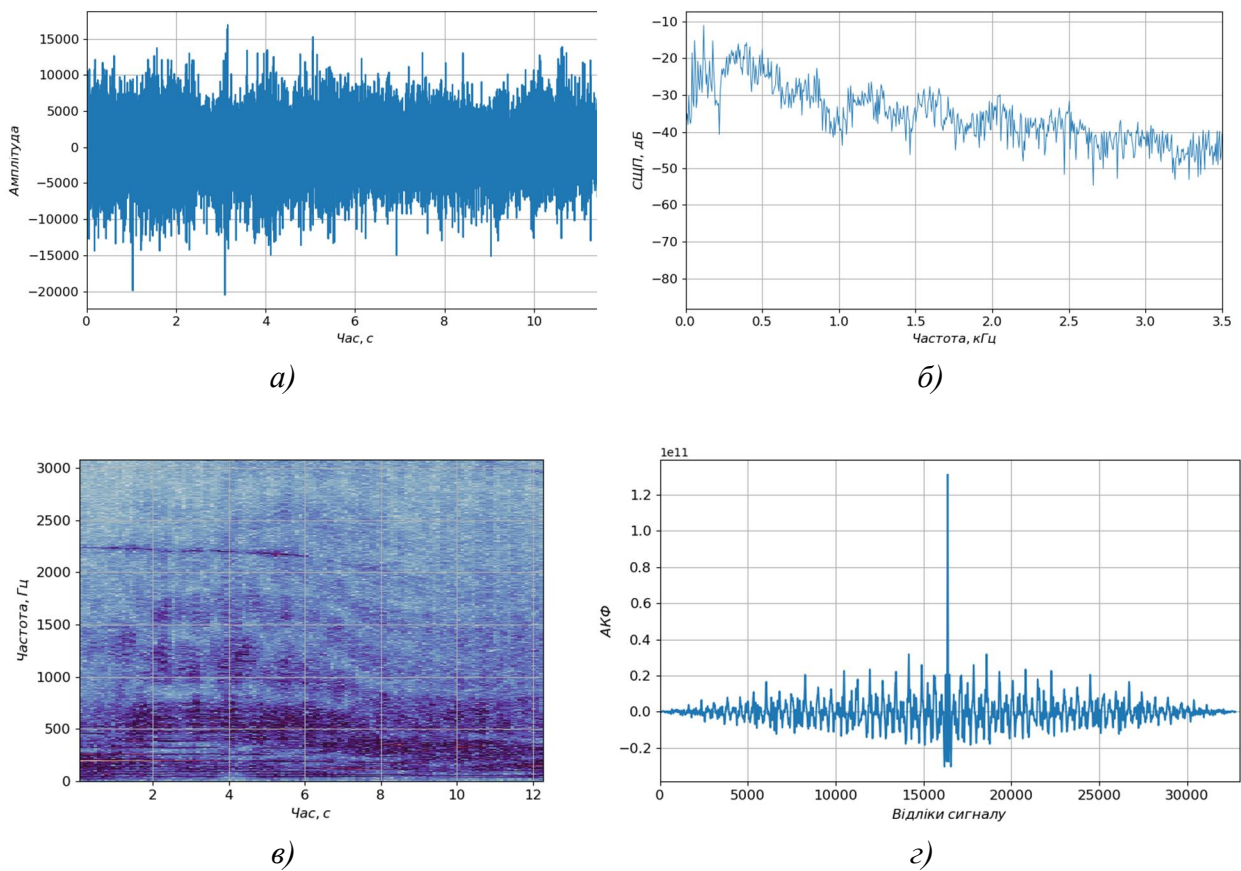


Рис. 14. Графіки залежностей параметрів акустичного сигналу гелікоптера:  
а) амплітуда; б) СЦП; в) спектрограма; г) АКФ

Додавши сигнали двох різних записів, було змодельовано акустичні сигнали одночасного прольоту двох ЗПН поблизу точки спостереження. Розглянемо наведені на рис. 15–18 спектрограми змодельованих сигналів. У разі двох БПЛА Shahed-136 чітко спостерігається подвоєння гармонічних складових на характерних частотах. Виділяючи в спектрі такого сигналу ряди гармонік з кратними частотами, можна зробити висновок про наявність одного чи більше джерел акустичного сигналу. Той же результат спостерігається в разі додавання гармонічних сигналів БПЛА та турбогвинтового літака чи гелікоптера. На частотно-часовій площині можна виділити кратні гармоніки як одного, так й іншого ЗПН.

У разі одночасного прольоту БПЛА Shahed-136 та ЗПН, оснащеного турбореактивним двигуном (КР, реактивний літак), більш потужний широкосмуговий сигнал реактивного засобу є домінуючим і затіняє собою менш потужний гармонічний сигнал БПЛА. Проте, оскільки швидкості цих ЗПН значно відрізняються, то і час реєстрації сигналу відповідно різняться. У паузах між прольотами реактивних зразків спостерігається збережена чітка полігармонічна структура акустичного сигналу БПЛА.

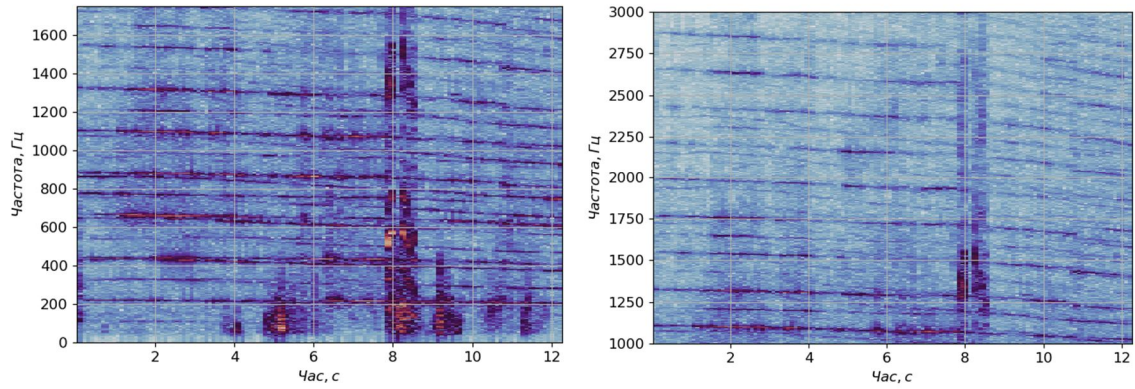


Рис. 15. Спектрограма суми сигналів двох БпЛА Shahed-136

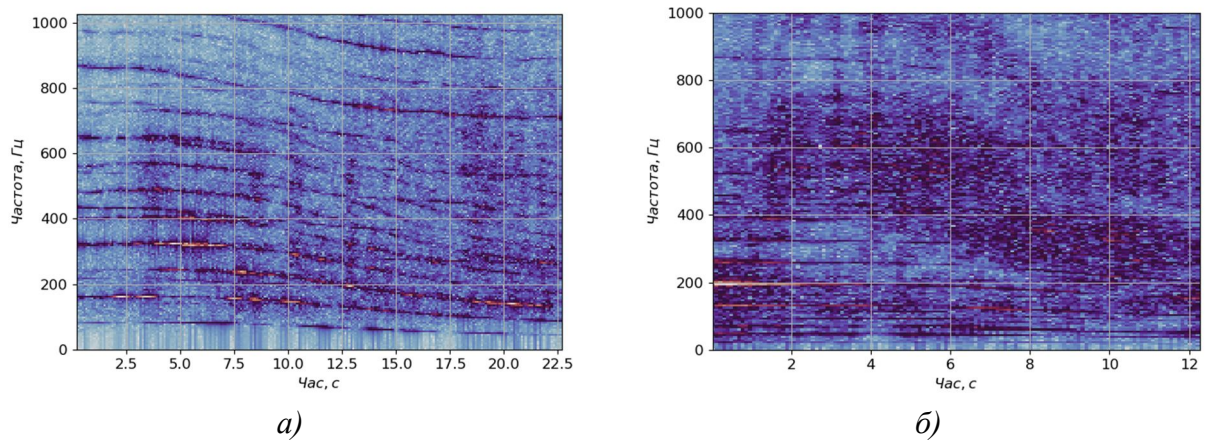


Рис. 16. Спектрограма суми сигналів: а) БпЛА Shahed-136 та турбогвинтового літака; б) БпЛА Shahed-136 та гелікоптра

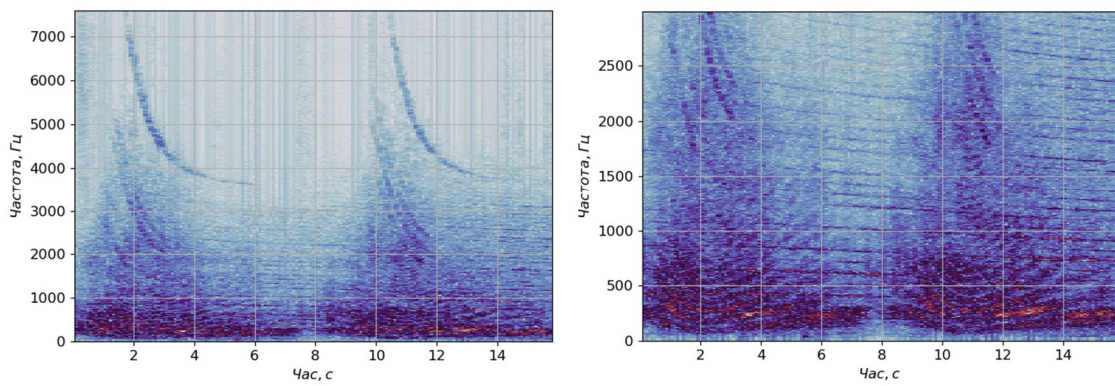


Рис. 17. Спектрограма суми сигналів БпЛА Shahed-136 та двох КР (пролітають одна за одною)

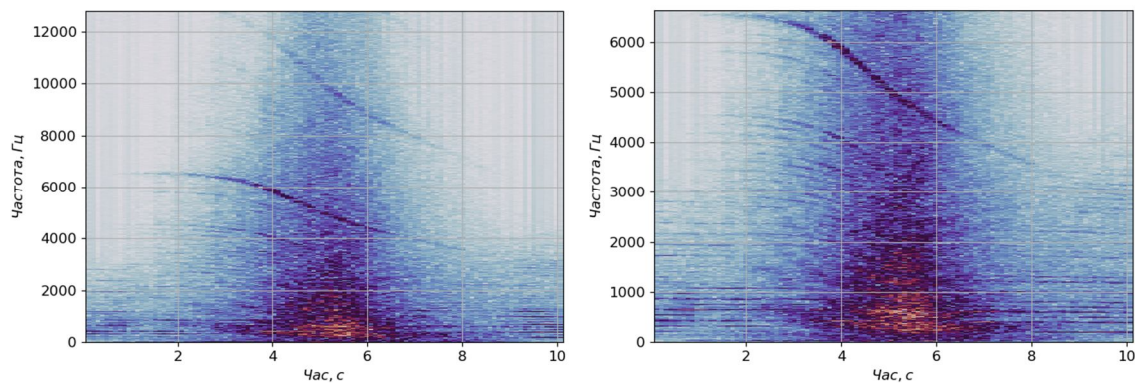


Рис. 18. Спектрограма суми сигналів БпЛА Shahed-136 та реактивного літака



**Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше було проаналізовано акустичні сигнали ЗПН, включаючи БПЛА Shahed-136. Встановлено, що акустичні сигнали ЗПН, оснащених повітряним гвинтом або поршнеvim двигуном, мають гармонічну структуру, а з турбореактивним двигуном – шумоподібну, з декількома слабко вираженими вузькосмуговими складовими. У разі одночасної реєстрації сигналів різнотипних ЗПН зберігається можливість їх ідентифікації. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням реальних записів акустичних сигналів, а також апробованого математичного апарату для їх аналізу.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у розробленні математичних моделей акустичних сигналів ЗПН, методів виявлення та розділення їх акустичних сигналів, а також визначення параметрів руху.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Визначення місця положення малорозмірних безпілотних літальних апаратів за акустичним випромінюванням / В. М. Олейніков, В. М. Карташов, С. О. Шейко та ін. // Радіотехніка. 2022. № 210. С. 113–127. <http://dx.doi.org/10.30837/rt.2022.3.210.09>
2. Бугайов М. Алгоритм виявлення акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів // Вісник ЖДТУ. 2015. № 3 (74). С. 46–53.
3. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення безпілотних літальних апаратів на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів // Вісник ЖДТУ. 2014. № 4 (71). С. 71–80.
4. Outdoor field trials for the measurement of the acoustic signals of mini UAVs / Naz Pierre, Hengy Sebastien, Ramamonjy Aro et al. // e-Forum Acusticum. December 7–11, 2020. 8 p. <http://dx.doi.org/10.48465/fa.2020.0224>
5. Minas B., Goldman G. H. Acoustic detection and tracking of a class I UAS with a small tetrahedral microphone array // Adelphi. MD 20783-1138. ARL-TR-7086. Report. 2014. 34 p.
6. Pham T., Srour N. TTCP AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs // U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE. 2004. Vol. 54. P. 24–29. <http://dx.doi.org/10.1117/12.548194>
7. Marino L. Experimental analysis of UAV-propellers noise // 16th AIAA 2010-3911. CEAS Aeroacoustics Conference. 2010. P. 1–14. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2010-3854>
8. Aircraft Flight Parameter Estimation Using Acoustical Lloyd's Mirror Effect / K. W. Lo, S. W. Perry, B. G. Ferguson // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. 38, № 1. January 2002. P. 137–151. <http://dx.doi.org/10.1109/7.993235>
9. Aircraft Noise (Excerpt from the Oakland International Airport Master Plan Update – 2006). URL: [https://flyquiotoak.com/wp-content/uploads/2022/04/aircraft\\_noise\\_fundamentals.pdf](https://flyquiotoak.com/wp-content/uploads/2022/04/aircraft_noise_fundamentals.pdf) (last accessed: 18.12.2023)
10. Усенко В. Шум повітряних гвинтів // Наукова думка сучасності і майбутнього. 2019. 36. 26. Ч. 1. С. 3–5.
11. L550-E-datasheet-en. URL: <https://limflug.de/downloads/datasheets/L550-E-datasheet-en.pdf> (last accessed: 25.11.2023).
12. Sound Propagation Modelling for Manned and Unmanned Aircraft Noise Assessment and Mitigation / Kapoor R., Kloet N., Gardi A. et al. // Atmosphere. 2021. Vol. 12. P. 1424. 22 p. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12111424>

13. Acoustic Source Localization in a Network of Doppler Shift Sensors / Lindgren D., Mehmet B. Guldogan, Gustafsson F. et al // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. 09–12 July 2013. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:646335/FULLTEXT01.pdf>

Стаття надійшла до редакції 20.12.2023.

## REFERENCES

1. Oleinikov, V. M., Kartashov, V. M., & Sheiko, S. O. et al. (2022). Vyznachennia mistsia polozhennia malorozmirnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ za akustychnym vyprominiuvanniam [Determining the position of small unmanned aerial vehicles by acoustic radiation]. *Radiotekhnika [Radio engineering]*, № 210, 113–127 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.30837/rt.2022.3.210.09>
2. Buhaiov, M. (2015). Alhorytm vyivlennia akustychnykh syhnaliv bezpilotnykh litalnykh aparativ [Algorithm for detection of acoustic signals of unmanned aerial vehicles]. *Visnyk ZhDTU [The Journal of Zhytomyr State Technological University]*, № 3 (74), 46–53 [in Ukrainian].
3. 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 [The Journal of Zhytomyr State Technological University]*, № 4 (71), 71–80 [in Ukrainian].
4. Naz Pierre, Hengy Sebastien, & Ramamonjy Aro et al. (December 7–11, 2020). Outdoor field trials for the measurement of the acoustic signals of mini UAVs. *e-Forum Acusticum*. <http://dx.doi.org/10.48465/fa.2020.0224>
5. Minas, B., & Goldman, G. H. (2014). Acoustic detection and tracking of a class I UAS with a small tetrahedral microphone array. *Army Research Laboratory*, MD 20783-1138. ARL-TR-7086.
6. Pham, T., & Srour, N. (2004). TTCF AG-6: Acousting detection and tracking of UAVs. *U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE*, Vol. 54, 24–29. <http://dx.doi.org/10.1117/12.548194>
7. Marino, L. (2010). Experimental analysis of UAV-propellers noise. In *16th AIAA 2010-3911. CEAS Aeroacoustics Conference*. (pp. 1–14). <http://dx.doi.org/10.2514/6.2010-3854>
8. Lo, K. W., Perry, S. W., & Ferguson, B. G. (January 2002). Aircraft Flight Parameter Estimation Using Acoustical Lloyd's Mirror Effect. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, № 1, 137–151. <http://dx.doi.org/10.1109/7.993235>
9. Aircraft Noise (Excerpt from the Oakland International Airport Master Plan Update – 2006). Retrived from [https://flyquiotoak.com/wp-content/uploads/2022/04/aircraft\\_noise\\_fundamentals.pdf](https://flyquiotoak.com/wp-content/uploads/2022/04/aircraft_noise_fundamentals.pdf)
10. Usenko, V. (2019). Shum povitrianykh hvyntiv [The noise of propellers]. *Naukova dumka suchasnosti i maibutnoho [Scientific opinion of the present and the future]*, Iss. 26, Part 1, 3–5 [in Ukrainian].
11. L550-E-datasheet-en. Retrived from <https://limflug.de/downloads/datasheets/L550-E-datasheet-en.pdf>

12. Kapoor, R., Kloet, N., & Gardi, A. et al. (2021). Sound Propagation Modelling for Manned and Unmanned Aircraft Noise Assessment and Mitigation. *Atmosphere*, Vol. 12, 1424. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12111424>
13. Lindgren, D., Guldogan, M. B., & Gustafsson, F. et al. (July 09–12, 2013). Acoustic Source Localization in a Network of Doppler Shift Sensors. In *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*. Retrived from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:646335/FULLTEXT01.pdf>

**V. V. Pozdniakov, M. V. Buhaiov**

### **ACOUSTIC SIGNALS ANALYSIS OF AERIAL ATTACK WEAPON**

*This paper analyzes the acoustic signals of aerodynamic aerial attack weapons used by the Russian Federation during a full-scale invasion. These include strike unmanned aerial vehicles, cruise missiles, jet and turboprop aircraft, and helicopters. It has been established that the time for observing an acoustic signal is limited by the speed of the vehicle. For high-speed targets (cruise missiles, airplanes), it averages 10 s, and for slower targets, 40-50 s. The Welch periodogram method was used to extract the spectral characteristics of acoustic signals. It is shown that the acoustic signal of propeller-driven vehicles is the sum of harmonic and noise-like broadband components, and that of turbojet-powered vehicles has a predominantly noise-like structure with several narrowband components. It was found that at the moment of maximum convergence, the signal spectrum has the greatest width. The characteristic change in the frequency of harmonic components associated with the Doppler effect is investigated. It can be used to estimate the parameters of motion and identify the vehicle. By correlation analysis of acoustic signals, it was found that broadband components have a noise-like structure. An acoustic signal for the case of simultaneous over flight of different types of vehicles was formed by adding records of different acoustic signals. It is shown that the characteristic spectral characteristics of all objects are preserved on the frequency-time plane. The results of the analysis can be used to build mathematical models of acoustic signals and to develop methods for processing signals of aerial attack weapons in an acoustic airspace monitoring system.*

**Keywords:** *aerial attack weapons; acoustic signal; spectrogram; acoustic monitoring system; harmonic component.*

О. Л. Сидорчук, В. Й. Залевський, В. В. Ковальчук

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВІДБИТТЯ ВІД РУПОРНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

*Стаття присвячена проблемі дослідження коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів, що входять до складу фазованої антенної решітки.*

*З'ясовано, що перевагою застосування рупорних антен є висока спрямованість їх випромінювання, значний коефіцієнт корисної дії та досить високий коефіцієнт підсилення. Проте їх основним недоліком є зворотне випромінювання (розсіювання) електромагнітних хвиль елементами конструкції антени. Це впливає на радіолокаційну помітність зразків озброєння і військової техніки та їх електромагнітну сумісність.*

*Для усунення зазначених недоліків у статті проаналізовано диференціальні характеристики діаграм зворотного розсіювання апертурних антен з метою покращення математичної моделі дослідження перевипроміненого поля з урахуванням коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів.*

*Авторами запропоновано вдосконалений математичний апарат розрахунку електромагнітного поля, перевипроміненого антенною решіткою, що складається з рупорних випромінювачів пірамідальної форми, за нормальної поляризації падаючої хвилі до площини її падіння, як один із випадків довільного падіння.*

*У ході дослідження з'ясовано причини та закономірності такого явища, як відбиття електромагнітних хвиль від внутрішніх неоднорідностей рупорних антен, задля його зменшення. Наведені графіки залежності амплітуд відбитого електромагнітного поля від кутів спостереження свідчать, що покращення узгодження в антенному тракті спричинить збільшення максимальної амплітуди сигналу в режимі передачі. Відповідно до принципу оберненості антен таке узгодження покращить поглинання хвиль вищих типів, що наводяться на розкритті одиночного випромінювача або еквідистантної антенної решітки. Це дозволить зменшити коефіцієнт стоячої хвилі за напругою та рівень бічних пелюсток. Отже, до зондуючої радіолокаційної станції надійде зменшений рівень відбитого сигналу, що дозволить покращити розвідзахищеність зразків озброєння, до складу яких входить рупор як окрема антена або в складі еквідистантних лінійних фазованих антенних решіток.*

**Ключові слова:** *фазована антенна решітка; пірамідальний рупорний випромінювач; зменшення ефективної поверхні розсіювання; коефіцієнт відбиття.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Сучасні зразки озброєння та військової техніки (ОВТ) у своєму складі мають велику кількість антен. Удосконалення їх тактико-технічних характеристик останнім часом передбачає заміну звичайних антен на більш досконалі. Найчастіше для цього застосовують фазовані антенні решітки (ФАР) [1–5]. Для підвищення коефіцієнта підсилення, дальності дії, збільшення кількості цілей необхідно є розробка нових ФАР, до складу яких входять звичайні рупорні опромінювачі, які, у свою чергу, також потребують удосконалення.

© О. Л. Сидорчук, В. Й. Залевський, В. В. Ковальчук, 2023

Головною перевагою рупорних антен у складі ФАР є висока спрямованість випромінювання, достатньо значний коефіцієнт корисної дії та можливість генерувати надпотужні електромагнітні хвилі. Такі показники визначають місце застосування рупорних антен як випромінювачів ФАР. Це може бути космічна галузь, наземна техніка радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби, особливо, де основною вимогою є висока потужність зразка ОБТ [1–7].

Однак у рупорних антен є і багато недоліків, серед яких виникнення зворотного розсіювання в область простору за рупором, що зумовлено перевипромінюванням електромагнітних хвиль струмами, наведеними в контурі кромки розкриву рупора, а отже, до прояву задніх пелюсток діаграми спрямованості антени та діаграми її розсіювання в передню півсферу. Також розсіювання виникає і на інших елементах антени. Такі недоліки впливають на радіолокаційну помітність зразків ОБТ та їх електромагнітну сумісність [1–4].

Для усунення або суттєвого зменшення таких недоліків необхідно проаналізувати диференціальні характеристики діаграм розсіювання антен з метою покращення математичної моделі дослідження перевипроміненого поля з урахуванням коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів ФАР.

**Формулювання завдання дослідження.** З урахуванням викладеного **метою статті** є аналіз диференціальних характеристик діаграм розсіювання антен та удосконалення математичної моделі дослідження коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів лінійної еквідистантної ФАР під час падіння нормально поляризованої до площини падіння хвилі під кутом  $\varphi$ , а також з'ясування причин і закономірностей такого явища для його зменшення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження характеристик розсіювання (вторинного випромінювання) електромагнітного поля від повітряних та наземних об'єктів займає важливе місце в радіолокації та радіонавігації. Іноді мають на увазі їх «радіолокаційну помітність», яка потребує зниження, оскільки від цього залежить живучість зразка озброєння. Захист об'єктів відбувається за рахунок застосування спеціальних форм і покриття радіопоглинальними матеріалами частин найбільш сильного вторинного випромінювання [2, 3].

З останніх досліджень [1–7] відомо, що суттєвий внесок у радіолокаційну помітність ОБТ роблять їх антенні системи. Особливо це стосується апертурних антен і ФАР радіолокаційних станцій (РЛС).

Дослідження причин і закономірностей розсіювання від ФАР доводить складність завдання щодо його усунення. Методи застосування спеціальних форм і покриттів, що знижують рівень відбитого випромінювання від самих об'єктів, не завжди прийнятні для їх антенних систем, оскільки призводять до погіршення їх інших характеристик, наприклад, коефіцієнтів посилення та спрямованої дії [3]. Тому виникає необхідність їх оптимізації за критерієм ефективність – помітність.

Останні публікації свідчать, що аналіз диференціальних характеристик діаграм розсіювання апертурних антен доцільно проводити, розглядаючи окремо різні його причини [8–11]. Для рупорних антен розсіювання зумовлене:

відбиттям від розкриву антени внаслідок незбігу (невідповідності) розподілу в розкриві полів хвиль, що падають зовні (у режимі прийому) і всередині (у режимі передачі);

дифракцією електромагнітної хвилі на кромках пірамідальної рупорної антени;

відбиттям від приймача;

неузгодженням поляризацій первинного поля і поля антени.

Розсіяння елементами конструкції рупорних антен, що входять до складу ФАР, у загальному випадку аналізувати складно.

Під час дослідження явищ розсіювання або перевипромінювання хвилі від ФАР її розглядають як групу випромінювачів, що є сукупністю блискучих точок. У цьому разі задача знаходження інтегральної та диференціальної поверхонь розсіювання зводиться до розрахунку ефективної площі розсіювання (ЕПР) групи її випромінювачів, на розкриві кожного з яких наводяться поверхневі струми і відбувається збудження амплітуд напруженості електромагнітного поля [11–12].

Оскільки в радіолокації ЕПР – це характеристика відбивної здатності цілі, що визначається відношенням потужності електромагнітної енергії, перевипроміненої або розсіяної ціллю в напрямку приймача (радар), до поверхневої щільності потоку енергії довільно падаючої плоскої хвилі, то необхідно провести розрахунок електромагнітного поля, перевипроміненого антенною решіткою, що складається з рупорних випромінювачів пірамідальної форми, за нормальної поляризації падаючої плоскої хвилі до площини її падіння, як одного з випадків довільного падіння.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження перевипроміненої від ФАР електромагнітної енергії необхідно починати з вивчення поля, відбитого від одного випромінювача (рис. 1), що входить до складу такої решітки, наприклад, рис. 2 [11].

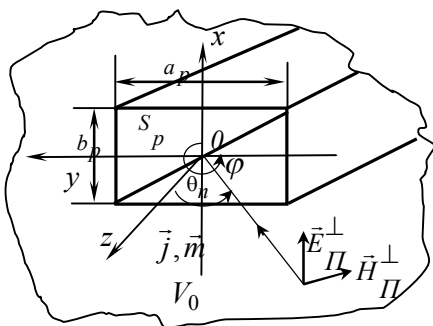


Рис. 1. Параметри хвелеводу для розрахунку розсіяного поля в разі падіння нормально поляризованої хвилі

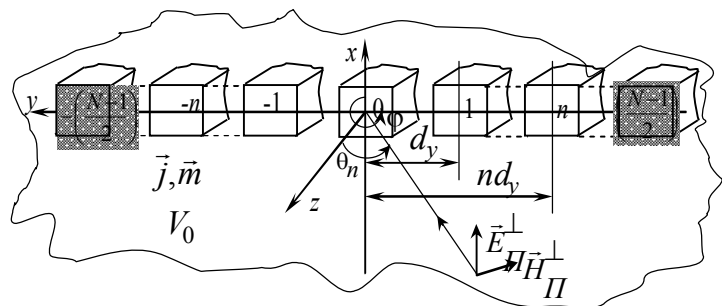


Рис. 2. Параметри лінійки рупорних випромінювачів для розрахунку розсіяного поля в разі падіння плоскої електромагнітної хвилі, нормально поляризованої до площини падіння

Такі дослідження поля, відбитого розкривом  $\vec{E}_{pp}$  одного або  $n$ -го випромінювача антенної решітки, у разі падіння на неї хвилі довільної форми від довільно заданих джерел, асимптотичними методами із застосуванням леми Лоренца було проведено в [13, 14].

Математична модель розрахунку цього поля має такий вигляд:

$$\vec{E}_{pp} = \frac{\vec{e}_p}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S_p} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} [\vec{A}_{+n} E_{+n} (1 + \rho_{-n})] e^{i(k_x x + k_y y)} - E_{vr} e^{i(k_x x + k_y y)} \right] dx dy \right\} e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y, \quad (1)$$

де  $S_p$  – поверхня інтегрування розкриву  $n$ -го випромінювача (рис. 2) із внутрішньої сторони;

$\vec{e}_p$  – одиничний вектор напруженості електромагнітного поля;

$\vec{A}_{+n}$  – спектральна функція комплексних амплітуд плоских хвиль, що збуджуються на розкриві;

$E_{+n}$  – вектор напруженості електромагнітного поля, що падає на  $n$ -й випромінювач;

$k_x, k_y, k_z$  – проекції хвильового вектора на осях  $x, y, z$ ;

$E_{vr}$  – вектор напруженості електромагнітного поля після врахування граничних умов і доповнення інтегрування до нескінченних меж поза поверхнею  $S_p$ ;

$\rho_{-n}$  – коефіцієнт відбиття від внутрішніх неоднорідностей  $n$ -го випромінювача.

Для випадку нормальної поляризації падаючої хвилі до площини її падіння  $\perp$  (рис. 1) після підстановки у вираз (1) власних функцій [13] й інтегрування їх за  $x$  та  $y$  тангенціальна складова поля  $\vec{E}_{pp\tau}^\perp$  дорівнюватиме

$$\vec{E}_{pp\tau}^\perp = -\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{b_p \sin\left(\frac{k_x b_p}{2}\right)}{\frac{k_x b_p}{2}} \times \sum_{n=1}^{\infty} A_{+n}^{H\perp} \left(\frac{n\pi}{a_p}\right)^2 \frac{\sin^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a_p}{2}\right) - i \cos^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k_y a_p}{2}\right)}{\left(\frac{n\pi}{a_p}\right)^2 - (k_y)^2} + \frac{\sin\left(\frac{a_p}{2}(k_y - k \sin\theta_\Pi)\right)}{\frac{a_p}{2}(k_y - k \sin\theta_\Pi)} \right\} \times e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y, \quad (2)$$

де  $a_p$  та  $b_p$  – розміри розкриву прямокутного  $n$ -го рупорного випромінювача (рис. 1);

$E_0$  – потужність випромінювання;

$\sum_{n=1}^{\infty} A_{+n}^{H\perp}$  – сума мод (типів хвиль) амплітуд магнітного типу;

$k$  – хвильове число;

$n$  – ціле число  $(0, 1 \dots n)$ .

Для хвиль інших типів вираз буде аналогічним, але з урахуванням хвильового опору вільного простору.

Коефіцієнти відбиття від розкриву рупора визначимо за умови узгодження двох ліній передач із хвильовим опором  $Z_0 = 120\pi$  Ом (опір вільного простору) і  $Z_B$  (хвильовий опір розкриву рупора) [10, 12].

Хвильовий опір розкриву рупора визначимо як співвідношення тангенціальних складових електричного і магнітного полів хвилеводу з розмірами розкриву. Тоді визначення хвильового опору справедливе не тільки для основного, але й для довільного типу хвилі [13–15].

Коефіцієнти відбиття від розкриву для хвиль магнітного та електричного типу визначаємо в такий спосіб:

$$\rho_{+mn}^H = \frac{Z_0 - Z_{Bmn}^H}{Z_0 + Z_{Bmn}^H} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2b_p}\right)^2 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} - 1}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2b_p}\right)^2 - \left(\frac{n\lambda}{2a_p}\right)^2} + 1}, \quad (3)$$

$$\rho_{+mn}^E = \frac{Z_0 - Z_{Bmn}^E}{Z_0 + Z_{Bmn}^E} = -\rho_{+mn}^H, \quad (4)$$

де  $m, n$  – кількість стоячих півхвиль, які вкладаються по сторонах  $x$  та  $y$ .

Вираз для розсіяного поля від розкриву без урахування внеску «паразитних» хвиль із формули (2) для випадку, наприклад,  $\theta = \theta_{II}$ ,  $\varphi = \varphi_{II} = 3\pi/2$  та, зважаючи на сферичну систему координат  $x = r \sin \theta \cos \varphi$ ,  $y = r \sin \theta \sin \varphi$ ,  $z = r \cos \varphi$ , запишемо в такому вигляді:

$$E_{rppx}^\perp \approx E_0 \frac{a_p b_p}{r \lambda} \cos \theta \frac{8}{\pi^2} (1 + \cos \theta) e^{-i(kr - \pi/2)} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \dot{K}_{p_n} D_n^\perp(\theta) (1 + \dot{\rho}_{-n}^H) - \frac{\pi^2}{8(1 + \cos \theta)} \sin \left( 2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta \right) \frac{1}{2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta} \right\}, \quad (5)$$

де

$$\dot{K}_{p_n} = \frac{1}{\left( n^2 \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{n\lambda}{2a_p} \right)^2} \right) (1 + \dot{\rho}_{-n} \dot{\rho}_{+n}) \right)}, \quad (6)$$

$$D_n^\perp(\theta) = \frac{\sin^4 \left( \frac{n\lambda}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta \right) - \cos^4 \left( \frac{n\lambda}{2} \right) \sin^2 \left( \frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left( 1 - \left( \frac{2a_p}{n\lambda} \sin \theta \right)^2 \right)^2}, \quad (7)$$

$$\rho_{+n} = \left( \sqrt{1 - \left( \frac{n\lambda}{2a_p} \right)^2} - 1 \right) \frac{1}{\left( \sqrt{1 - \left( \frac{n\lambda}{2a_p} \right)^2} + 1 \right)}. \quad (8)$$



Якщо врахувати внесок «паразитних» хвиль, то для розсіяного поля матимемо

$$E_{rpx}^{\perp} \approx E_0 \frac{a_p b_p}{r \lambda} \cos \theta \frac{8}{\pi^2} (1 + \cos \theta) e^{-i\left(kr - \frac{\pi}{2}\right)} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} K_{\rho_n} \left[ D_n^{\perp}(\theta) (1 + \rho_{-n}^H) + \sum_{p=3}^{\infty} \dot{K}_{s_{np}} B_{np} e^{-i2\gamma_p} \right] - \frac{\pi^2}{8(1 + \cos \theta)} \frac{\sin\left(2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta\right)}{2\pi \frac{a_p}{\lambda} \sin \theta} \right\}, \quad (9)$$

де

$$\dot{K}_{s_{np}} = \frac{-tg\theta_{0n} n^2 (1 + \cos n\pi \cos p\pi)}{\left(\frac{a_p}{\lambda}\right)^3 8\pi \sqrt{1 - \left(\frac{p\lambda}{2a_p}\right)^2} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{1a_p}\right)^2}\right) \left(\sqrt{1 - \left(\frac{p\lambda}{1a_p}\right)^2}\right)}, \quad (10)$$

$$B_{np} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi p}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta\right) - \cos^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\pi p}{2}\right) \sin^2\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \theta\right)}{\left(1 - \left(\frac{2a_p}{p\lambda} \sin \theta\right)^2\right) \left(1 - \left(\frac{2a_p}{n\lambda} \sin \theta\right)^2\right)}, \quad (11)$$

$$\gamma_p = \frac{p\pi}{2tg\theta_{0n}} \left[ \sqrt{\left(\left(\frac{2a_p}{p\lambda}\right)^2 - 1\right)} - \arccos\left(\frac{p\lambda}{2a_p}\right) \right], \quad (12)$$

де  $p$  – ціле число  $(0, 1 \dots n)$ .

Для лінійної еквідистантної антенної решітки (рис. 2) з урахуванням відстані між випромінювачами та їх кількості вираз для розсіяного поля (2) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{RrT}^{\perp} \text{ решітки} = & \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int \left\{ \frac{b_p \sin\left(\frac{k_x b_p}{2}\right)}{\frac{k_x b_p}{2}} \cdot \left[ \sum_{m_y=1}^{\infty} -2A_{+0m_y}^{\perp n} \left(\frac{m_y \pi}{a_p}\right)^2 (1 + \rho_{0m_y}^H) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \sin^2\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a_p}{2}\right) - i \cos^2\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k_y a_p}{2}\right) \right] \right. \\ & \left. \times \exp(-ink_y d_y) \frac{\sin^2\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \cos\left(\frac{k_y a_p}{2}\right) - i \cos^2\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \sin\left(\frac{k_y a_p}{2}\right)}{\left(\frac{m_y \pi}{a_p}\right)^2 - k_y^2} - \right. \\ & \left. - E_0 \exp(ind_y (k \sin \theta_{II} - k_y)) \frac{\sin\left(\frac{a_p}{2} (k_y - k \sin \theta_{II})\right)}{\frac{a_p}{2} (k_y - k \sin \theta_{II})} \right\} \times \exp(-i(k_x x + k_y y + k_z z)) dk_x dk_y, \quad (13) \end{aligned}$$

де  $m_y$  – кількість стоячих півхвиль, які вкладаються по стороні  $y$ , а  $A_{+0m_y}^{H_1}$  вже було визначено в роботах [10, 11].

У (13) також використано коефіцієнт відбиття. На відміну від відомих, він дозволяє розрахувати поле не тільки для  $n$ -го рупорного випромінювача, але й для всієї лінійної або прямокутної еквідистантної антенної решітки. Вираз (13) відрізняється від (6) урахуванням відстані до першого випромінювача  $d_y$  та до  $n$ -го  $nd_y$ . Відмінність також полягає у використанні для (13) додаткових множників:  $\exp(-ink_y d_y)$  та  $\exp(ind_y(k \sin \theta_{\Pi} - k_y))$ .

Із математичної моделі (3), до якої входить складова (6), добре видно, що коефіцієнти відбиття  $\rho_{-n}^H$ , наприклад, хвилі  $H$  типу у зворотному напрямку ( $-n$ ) від внутрішніх неоднорідностей залежатимуть від співвідношення розмірів рупора й довжини падаючої розкрити хвилі. У цьому разі можливі чотири випадки, розглянемо їх.

1. Якщо падаюча хвиля має частоту нижчу критичної для розкрити рупора, то вона повністю відбивається від розкрити.

2. Падаюча хвиля має частоту нижчу критичної для живильного рупора хвилеводу. У цьому разі всі хвилі, збуджені в розкрити, будуть відбиватися від позамежних для них перерізів рупора.

3. Падаюча хвиля має частоту, що входить у робочий діапазон антени. Тоді збуджена в розкрити основна хвиля проходить в живильний хвилевід. Її відбиття залежить від навантаження хвилеводу і місця його з'єднання з рупором. Вищі типи хвиль, збуджені в розкрити, не проходять у хвилевід, а відіб'ються від позамежних для них перерізів, як і в другому випадку.

4. Коли падаюча хвиля має частоту вищу за робочий діапазон рупорної антени, то деякі хвилі вищих типів, для яких хвилевід не є позамежним, разом із основною хвилею будуть проходити в нього, а коефіцієнт відбиття для них залежатиме від навантаження. Решта ж хвиль вищих типів, що не пройшли у хвилевід, як у другому та третьому випадках, відбиватимуться від позамежних для них перерізів у рупорі.

У статті наведено розрахункові формули для коефіцієнтів відбиття для випадку, якщо відоме навантаження для хвиль основного типу прямокутного хвилеводу, за умови, що хвилі вищих типів не проникають у живильний хвилевід. Ці формули придатні для розрахунку загальної ЕПР рупорів, що входять до ФАР, у перших трьох випадках співвідношення розмірів рупора й довжини падаючої хвилі. Щоб отримати формули для четвертого випадку, необхідно знати коефіцієнти відбиття для хвиль вищих типів від неоднорідностей прямокутного хвилеводу.

**Результати моделювання.** На рис. 3 наведено ідеальну діаграму розсіювання рупора (у задній півсфері). Цього досягти нереально, оскільки втрати, спричинені перевипромінюванням, будуть завжди. Відповідно, для аналізу диференціальних характеристик діаграм розсіювання апертурних антен необхідно розглядати окремо ці причини.

На рис. 4 наведено діаграму розсіювання реального рупора, що має значну задню пелюстку, спричинену перевідбиттям електромагнітної хвилі кромками (краями) рупора,

проте без врахування інших причин розсіювання. Надалі необхідно їх врахувати та прагнути досягти максимального узгодження в антенному тракті, зважаючи на залежність довжини падаючої на розкрив рупора хвилі від співвідношень його розмірів.

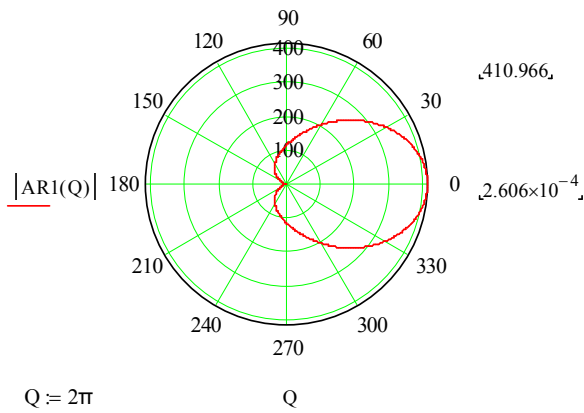


Рис. 3. Діаграма розсіювання ідеального рупора (без розсіювання в задню півсферу)

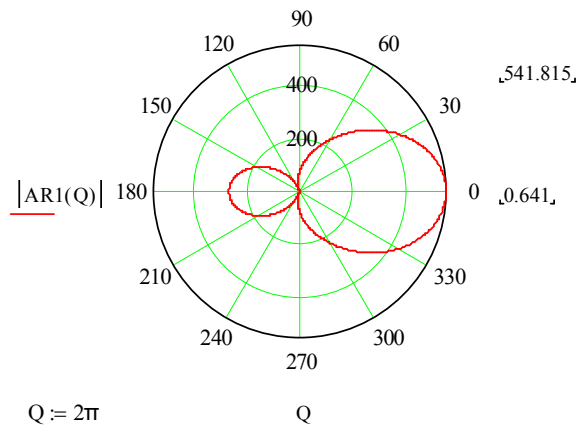


Рис. 4. Діаграма розсіювання реального рупора

Графіки залежностей амплітуди хвилі  $H$  типу  $A_{+n}^{H\perp}$  від  $n$ , що враховані в математичній моделі (2), наведено на рис. 5. Залежність амплітуд основної хвилі  $H_{0n}$  та хвиль вищих типів, за умови, що падаюча хвиля має частоту ( $\lambda = 0,05$  м), нижчу критичної для розкриття рупора, показано на рис. 5а. У цьому разі падаюча хвиля повністю відбивається від розкриття.

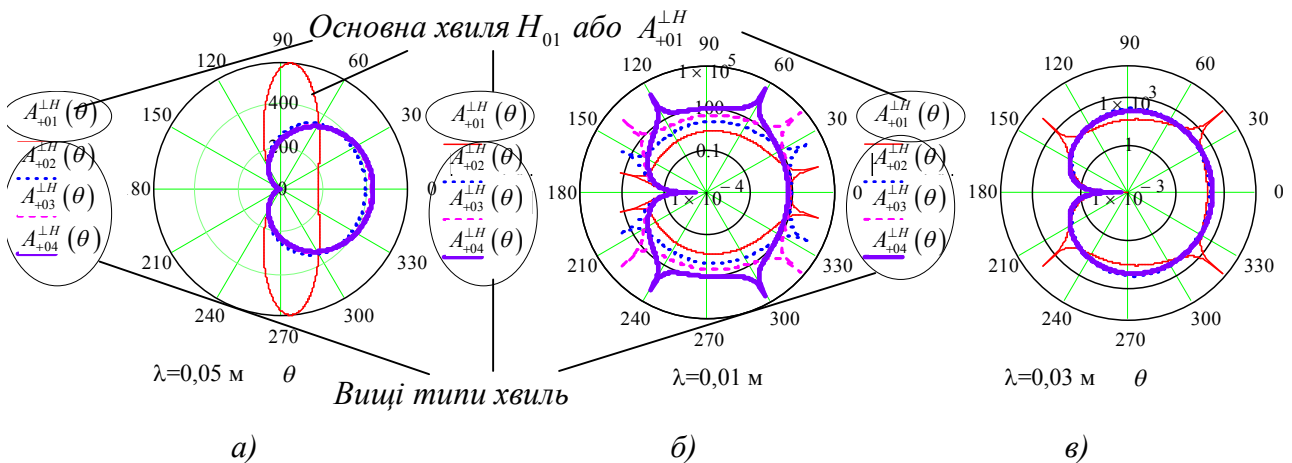


Рис. 5. Графіки залежностей  $A_{+n}^{H\perp}$  від  $n$  для різних значень довжини хвилі, що падає

На рис. 5б падаюча хвиля має частоту вищу за робочий діапазон  $\lambda = 0,01$  м. У такому разі деякі хвилі вищих типів, для яких хвилевід не є поза межним, разом із основною хвилею будуть проходити в нього, а коефіцієнт відбиття для них залежатиме від навантаження.

Якщо падаюча хвиля має частоту, що входить у робочий діапазон антени (рис. 5в), то збуджена в розкриві основна хвиля буде проходити в живильний хвилевід. Її відбиття залежатиме від навантаження хвилеводу і місця його з'єднання з рупором.

На рис. 6 наведено залежність амплітуди  $H$  хвилі (13), що відбивається від внутрішніх неоднорідностей у рупорі, від кута спостереження  $\theta$  за різних значень загального коефіцієнта відбиття  $\rho_m^H$ . Аналіз показує, що чим більший коефіцієнт відбиття (від 0,3 до 0,95), то більша тангенціальна складова амплітуди відбитої хвилі  $A_{+0m_y}^{\perp n}$ .

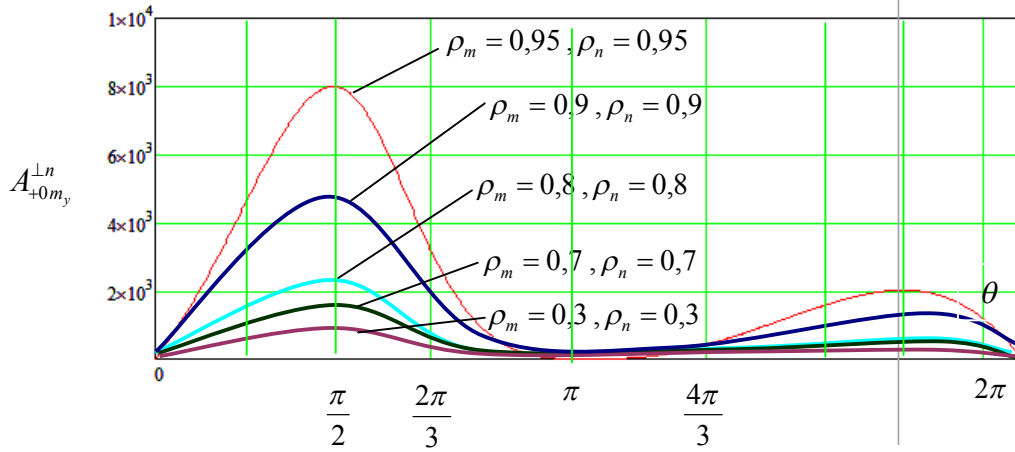


Рис. 6. Залежність  $A_{+0m_y}^{\perp n}$  від коефіцієнтів відбиття  $\rho_m^H$

З рис. 6 видно, що покращення узгодження в антенному тракті спричинить збільшення максимальної амплітуди напруженості електромагнітного поля основної хвилі та хвиль вищих типів, а за законом оберненості антен – і зростання потужності сигналу в режимі передачі.

На рис. 7 наведено максимальні значення суперпозиції амплітуд основних мод напруженості електромагнітного поля  $\sum_{m_y=1}^{\infty} (-)2A_{+0m_y}^{\perp n}$  з формули (13) для лінійної антенної решітки залежно від зміни коефіцієнта відбиття всередині рупора. Моделювання проводилося для  $\rho = 0,8$  – лінія 1 та для  $\rho = 0,6$  – лінія 2 [16].

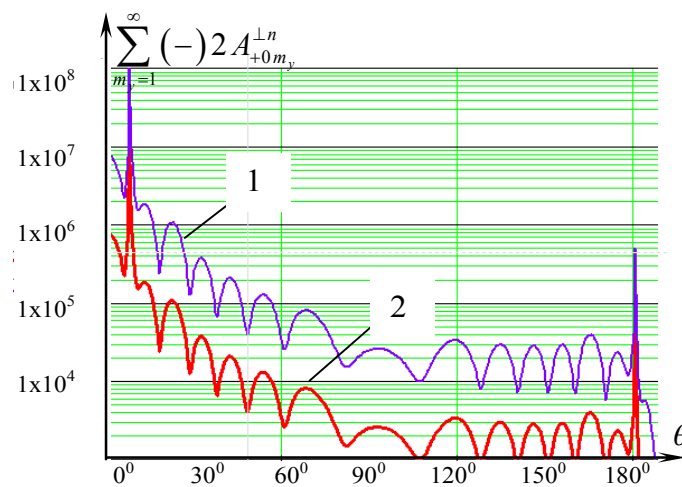


Рис. 7. Максимальні значення суми амплітуд напруженості електромагнітного поля

основної хвилі та хвиль вищих типів  $\sum_{m_y=1}^{\infty} (-)2A_{+0m_y}^{\perp n}$

## **Висновки**

1. Удосконалено математичну модель з урахуванням коефіцієнтів відбиття від рупорних випромінювачів лінійної еквідистантної ФАР під час падіння нормально поляризованої до площини падіння хвилі та з'ясовано причини й закономірності такого явища для його зменшення.

2. Наведені на рис 5–7 графіки амплітуд хвилі як функцій кута спостереження свідчать, що покращення узгодження в антенному тракті спричинить до збільшення максимальної амплітуди сигналу в режимі передачі. Відповідно до принципу оберненості антен таке узгодження покращить поглинання вищих типів хвиль, що наводяться на розкритті одиночного випромінювача або еквідистантної антенної решітки [16–18]. Це дозволить зменшити коефіцієнт стоячої хвилі за напругою та рівень бічних пелюсток. Отже, до зондувальної РЛС надійде зменшений рівень перевипроміненого сигналу, що дозволить покращити розвідзахищеність зразка озброєння з ФАР.

3. Наведені вирази (5–9) для одного випромінювача і (13) для еквідистантної антенної решітки мають не тільки розрахунково-практичне, але й методичне значення. Їх послідовне виведення й фізичні інтерпретації дозволять оцінити межі їх використання в дослідженні розсіяного (пере випроміненого) поля не тільки ФАР, але й інших антенних систем, до складу яких входять рупори пірамідальної форми.

4. Отримані результати сприятимуть розвитку електродинамічної теорії та покращенню розрахункових методів, вони можуть бути застосовані для розробки алгоритмів виявлення і розпізнавання радіолокаційних об'єктів.

5. У подальших дослідженнях необхідно врахувати коефіцієнти відбиття для хвиль вищих типів від неоднорідностей всередині прямокутного хвилеводу та місці його з'єднання з рупорним випромінювачем.

## **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Сидорчук О. Л. Аналіз методів і способів зменшення ефективної поверхні розсіювання антенних систем // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2012. № 2 (61). С. 94–106.
2. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / Под ред. О. И. Сухаревского. Харьков : Харьковский ун-т Воздушных Сил им. И. Кожедуба, 2009. 466 с.
3. Артюшин Л. М., Куртсеітов Т. Л., Мірненко В. І., Сидорчук О. Л. Можливості застосування протирадіолокаційних покриттів в антенних системах засобів озброєння та військової техніки з метою зменшення їх радіолокаційної помітності // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки й оборони. Київ : НАУ, 2016. Вип. 2 (26). С. 104–109.
4. Дубровка Ф. Ф., Сушко О. Ю. Ультраширокопосмугова рупорна антена діапазону частот 120 ГГц з низьким рівнем бокового випромінювання // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». 2010. № 41. С. 68–73.
5. Фриз С. П., Кальватинський О. В., Топольницький П. П. Використання синфазних антенних решіток для прийому інформації від космічних апаратів з малим рівнем випромінювання в напрямку приймальної станції // Озброєння та військова техніка : наук.-техн. журнал. Київ : ЦНДІ ОВТ, 2015. № 3 (7). С. 44–51.

6. Залевский Г. С. Обзор методов расчета вторичного излучения радиолокационных объектов // Системы обробки інформації : зб. наук. праць. Харків : ХУПС, 2007. Вип. 7 (65). С. 16–24.
7. Белевищук Я. О., Василець В. О., Нечитайло С. В. Метод розрахунку ефективної поверхні розсіювання наземної техніки, оснащеної багатоелементними антенами // Авиационно-космическая техника и технологи. Харків : ХУПС, 2009. № 8 (65). С. 169–174.
8. Сидорчук О. Л., Залевський В. Й. Дослідження дифракції електромагнітної хвилі на кромках пірамідальної рупорної антени як однієї з причин розсіювання // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». 2022. № 89. С. 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.11-20>.
9. Сидорчук О. Л. Проблематика методів оцінювання антен зі зменшеною ефективною поверхнею розсіювання засобів радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2022. Вип. 22. С. 14–29. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22.02>.
10. Сидорчук О. Л. Дифракція плоскої електромагнітної хвилі на рупорній антені // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир, 2010. № 2 (53). С. 167–175.
11. Сидорчук О. Л. Дослідження амплітуд поля, збудженого лінійною решіткою рупорних опромінювачів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». 2016. Вип. 62. С. 31–39.
12. Електродинаміка та поширення радіохвиль / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. // Випромінювання та поширення радіохвиль. Ч. 2 : підруч. для студентів ВНЗ. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2010. 435 с.
13. Сидорчук О. Л. Розрахунок ефективності поверхні розсіювання рупорної антени при падінні на неї хвилі довільної форми із застосуванням леми Лоренца // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. Житомир : ЖДТУ, 2011. № 2 (57). С. 102–113. [http://doi:10.26642/tn-2011-2\(57\)-103-113](http://doi:10.26642/tn-2011-2(57)-103-113)
14. Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection, and tracking / Y. D. Shirman, S. A. Gorshkov, S. P. Leschenko et al. Boston, London : Artech house, 2002. 294 p.
15. Bergman J. R. and Moreira F. J. S. An Omnidirectional ADE Reflector Antenna // Microw. Opt. Tech. Lett. 2004. Vol. 40, No. 2. P. 345–349.
16. Сидорчук О. Л., Соболенко С. О., Ковальчук В. В., Марищук Л. М. Розв'язування рівняння методом сідлової точки для електромагнітного поля, розсіяного рупорним випромінювачем // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратобудування». 2023. № 91. С. 28–36. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.28-36>
17. Yu. Dong and T. Itoh. Composite right/left-handed substrate integrated waveguide and half mode substrate integrated waveguide leaky-wave structures // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, No. 3. P. 767–775. <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2010.2103025>
18. F. Xu and K. Wu. Understanding Leaky-Wave Structures // IEEE Microwave Magazine. July/Aug. 2013. Vol. 14, No. 5. P. 87–96. <http://dx.doi.org/10.1109/mmm.2013.2259400>

Стаття надійшла до редакції 20.12.2023.

REFERENCES

1. Sydoruk, O. L. (2012). Analiz metodiv i sposobiv zmeshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia antenykh system [Analysis of Methods and Ways of Reducing the Effective Scattering Surface of Antenna Systems]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin ZhSTU. Technical Sciences]*, 2 (61), 94–106. Zhytomyr [in Ukrainian].
2. Sukharevskii, O. I. (Eds.). (2009). *Rasseianie elektromagnitnykh voln vozduzhnymi i nazemnymi radiolokatsionnymi ob'ektami [Scattering of Electromagnetic Waves by Air and Ground Radar Objects]*. Khar'kov [in Russian].
3. Artiushyn, L. M., Kurtseitov, T. L., Myrnenko, V. I., & Sydoruk, O. L. (2016). Mozhlyvosti zastosuvannia protyradiolokatsiinykh pokryttiv u antenykh systemakh zasobiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky z metoiu zmeshennia yikh radiolokatsiinoi pomitnosti [Possibilities of Using Anti-Radar Coatings in Antenna Systems of Weapons and Military Equipment in Order to Reduce Their Radar Visibility]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky i oborony [Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense]*, 2 (26), 104–109. Kyiv [in Ukrainian].
4. Dubrovka, F. F., & Sushko, O. Yu. (2010). Ultrashyrokosmuhova ruporna antena diapazonu chastot 120 HHts z nyzkym rivnem bokovoho vyprominiuvannia [Ultra-broadband Horn Antenna of the Frequency Range of 120 GHz with a Low Level of Lateral Radiation]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio Equipment. Radio Equipment Construction"]*, 41, 68–73. Kyiv [in Ukrainian].
5. Fryz, S. P., Kalvatynskiy, O. V., & Topolnytskyi, P. P. (2015). Vykorystannia synfaznykh antenykh reshitok dlia pryomu informatsii vid kosmichnykh aparativ z malym rivnem vyprominiuvannia v napriamku pryimalnoi stantsii [The Use of in-Phase Antenna Arrays for Receiving Information from Space Vehicles with a Low Level of Radiation in the Direction of the Receiving Station]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika : nauk.-tekhn. zhurnal TsNDI OVT [Armaments and Military Equipment: Science and Technology. Magazine]*, № 3 (7), 44–51. Kyiv [in Ukrainian].
6. Zalevskii, G. S. (2007). Obzor metodov rascheta vtorichnogo izlucheniia radiolokatsionnykh ob'ektov [Overview of Methods for Calculating the Secondary Radiation of Radar Objects]. *Sistemi obrobki informatsii [Information Processing Systems]*, 7 (65), 16–24. Kharkiv: KAFU [in Russian].
7. Belevyshchuk, Ya. O., Vasylets, V. O., & Nechytailo, S. V. (2009). Metod rozrakhunku efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia nazemnoi tekhniky, osnashchenoi bahatoelementnymi antenamy [A Method of Calculating the Effective Scattering Surface of Ground Equipment Equipped with Multi-Element Antennas]. *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohyy [Aerospace Equipment and Technologies.]*, 8 (65), 169–174. Kharkiv [in Ukrainian].
8. Sydoruk, O. L., & Zalevskiy, V. Y. (2022). Doslidzhennia dyfraktsii elektromagnitnoi khvyli na kromkakh piramidalnoi rupornoj anteny yak odniei z prychn rozsiuvannia [Investigation of Electromagnetic Wave Diffraction at the Edges of a Pyramidal Horn Antenna as One of the Causes of Scattering]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio Equipment. Radio Equipment Construction"]*, 89, 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.11-20>

9. Sydoruk, O. L. (2022). Problematyka metodiv otsiniuvannia anten zi zmenshenoiu efektyvnoiu poverkhneiu rozsiuvannia zasobiv radioelektronnoi rozvidky ta radioelektronnoi borotby [Challenges of Evaluation Methods for Antennas with Reduced Effective Scattering Surfaces in Signals Intelligence and Electronic Warfare Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, Iss. 22, 14–29. Zhytomyr: ZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22.02> [in Ukrainian].
10. Sydoruk, O. L. (2010). Dyfraktsiia ploskoi elektromahnitnoi khvyli na rupornii anteni [Diffraction of a Plane Electromagnetic Wave on a Horn Antenna]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin ZhSTU. Technical Sciences]*, № 2 (53), 167–175. Zhytomyr [in Ukrainian].
11. Sydoruk, O. L. (2016). Doslidzhennia amplitud polia, zbudzhenoho liniinoiu reshitkoiu rupornykh oprominiuvachiv [Study of Amplitudes of the Field Excited by a Linear Grid of Horn Irradiators]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio Equipment. Radio Equipment Construction"]*, 67, 5–11. <https://doi.org/10.20535/radap.2016.67.5-11> [in Ukrainian].
12. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2010). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyli. Ch. 2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia radiokhvyli [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 2. Radiation and Propagation of Radio Waves]*. Kharkiv [in Ukrainian].
13. Sydoruk, O. L. (2011). Rozrakhunok efektyvnosti poverkhni rozsiuvannia rupornoii anteny pry padinni na nei khvyli dovilnoi formy iz zastosuvanniam lemy Lorentsa [Investigation of the Efficiency of the Surface of the Horn Antenna Expansion in Case of a Fall on it of a Fine Form Due to the Lorenz Stagnation]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin ZhSTU. Technical sciences]*, 2 (57), 102–113. [https://doi.org/10.26642/tn-2011-2\(57\)-103-113](https://doi.org/10.26642/tn-2011-2(57)-103-113) [in Ukrainian].
14. Shirman, Y. D., Gorshkov, S. A., & Leschenko, S. P. et al. (2002). *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking*. Boston, London.
15. Bergman, J. R., & Moreira, F. J. S. (2004). An Omnidirectional ADE Reflector Antenna. *Microw. Opt. Tech. Lett., Vol. 40, No. 2*, 345–349.
16. Sydoruk, O. L., Sobolenko, S. O., Kovalchuk, V. V., & Maryshchuk, L. M. (2023). Rozv'iazuvannia rivniannia metodom sidlovoi tochky dlia elektromahnitnoho polia, rozsiianoho rupornym vyrominiuvachem [Solving the Equation Using the Saddle Point Method for the Electromagnetic Field Scattered by a Horn Emitter]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii «Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio Equipment. Radio Equipment Construction"]*, 91, 28–36. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.28-36> [in Ukrainian].
17. Dong, Yu., & Itoh, T. (2011) Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Structures. *IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 3*, 767–775. <http://dx.doi.org/10.1109/tap.2010.2103025>
18. Xu, F., & Wu, K. (2013). Understanding Leaky-Wave Structures. *IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, No. 5*, 87–96. <http://dx.doi.org/10.1109/mmm.2013.2259400>



**O. L. Sydorчук, V. J. Zalevskiy, V. V. Kovalchuk**

**SIMULATION OF REFLECTION FROM HORN EMITTERS OF PHASED ANTENNA ARRAYS TO DETERMINE THE COEFFICIENTS**

*The article is devoted to the problem of researching reflection coefficients from horn emitters that are part of a phased antenna array.*

*It was found that the advantage of using horn antennas is the high directivity of their radiation, a significant efficiency and a fairly high amplification factor. However, their main drawback is the back radiation (scattering) of electromagnetic waves by the elements of the antenna design. This affects the radar visibility of samples of weapons and military equipment and their electromagnetic compatibility.*

*To eliminate these shortcomings, the article analyzes the differential characteristics of the backscatter diagrams of aperture antennas in order to improve the mathematical model of the reradiated field study, taking into account the reflection coefficients from horn emitters.*

*In the course of the study, the causes and regularities of such a phenomenon as the reflection of electromagnetic waves from internal inhomogeneities of horn antennas were clarified, in order to reduce it. The given graphs of the dependence of the amplitudes of the reflected electromagnetic field on the observation angles show that the improvement of the alignment in the antenna path will cause an increase in the maximum signal amplitude in the transmission mode. According to the principle of inversion of antennas, such an arrangement will improve the absorption of waves of higher types directed to the openings of a single emitter or an equidistant antenna array. This will reduce the voltage standing wave factor and the level of side lobes. Therefore, the sounding radar station will receive a reduced level of the reflected signal, which will improve the defense of weapons samples that include a horn as a separate antenna or as part of equidistant linear phased antenna arrays.*

**Keywords:** *phased antenna array; pyramidal horn emitter; reduction of the effective scattering surface; reflection coefficient.*

О. М. Наумчак

## АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВИДАЛЕННЯ ХМАРНОСТІ НА КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Сучасний розвиток космічних технологій та дистанційного зондування Землі надає унікальні можливості для вирішення завдань у багатьох сферах, зокрема й у військовій. Космічні знімки, отримані за допомогою дистанційного зондування, часто відіграють ключову роль у процесі прийняття рішень на всіх рівнях військового управління. Тому одним із важливих завдань у цьому контексті є видалення хмарності. Це важливий етап обробки даних дистанційного зондування, спрямований на реконструкцію інформації, прихованої цими атмосферними збуреннями. Стаття присвячена аналізу різних підходів до видалення хмарності та покращення якості отриманих даних. Традиційні підходи, що базуються на використанні різноманітних алгоритмів обробки зображень, мають певні обмеження, пов'язані з частою втратою корисної інформації. Особливу увагу приділено методам глибокого навчання, які набули популярності в розв'язанні проблем видалення хмарності. Глибокі нейронні мережі (DNN) демонструють свій великий потенціал для відновлення прихованої хмарами інформації на космічних знімках. У статті розглянуто різні архітектури DNN (згорткові нейронні мережі (CNN), умовно-генеративні змагальні мережі (cGAN)) та їх модифікації, визначено їх переваги та недоліки. Використання новітніх методів є більш точним та ефективним порівняно із традиційними методами обробки зображень, адже нейронні мережі можуть адаптуватися до різноманітних умов та типів знімків. Проаналізовані недоліки злиття суто оптичних даних дозволили дійти висновку, що найкращим вирішенням завдання видалення хмарності з космічних знімків є поєднання оптичних та радіолокаційних даних. Незважаючи на складність такого підходу, він може показати найбільшу ефективність для розв'язання порушеної в статті проблеми. Розглянуто виклики та перспективи подальшого вдосконалення методів видалення хмарності на космічних знімках, зокрема з використанням алгоритмів штучного інтелекту для автоматичної детекції та видалення хмар. Обґрунтовано потребу у створенні стандартизованих методик для порівняння та оцінювання ефективності різних підходів.

**Ключові слова:** космічні знімки; дистанційне зондування Землі; хмарність; нейронні мережі.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Безперервний технологічний прогрес, зокрема й у космічній галузі (підвищення розрізненості зображень, розширення можливостей оброблення даних, мініатюризація супутникових компонентів тощо), сприяє розвитку спроможностей, що становлять інтерес і для військових цілей. Ці досягнення розширюють потенціал космічних апаратів (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та роблять їх більш доступними. Останні тенденції в галузі лише підтверджують актуальність окресленої теми.

© О. М. Наумчак, 2023

Аналіз перебігу сучасної російсько-української війни показав, що вона переходить на новий етап, який характеризується статичними та виснажливими боями. Така “позиційна” війна вигідна ворогу, тому що дозволить акумулювати резерви та відновити військову міць. Тому Збройні Сили України потребують удосконалення ключових військових можливостей і технологій, щоб вийти з такого роду війни [1]. Використання даних ДЗЗ (особливо космічних знімків високої розрізненості) відіграє важливу роль для підтримки прийняття рішень на усіх рівнях, оскільки цей процес безпосередньо залежить від оперативності й достовірності оброблення цих даних.

Деталізація космічних знімків високої розрізненості дозволяє вирішувати широкий спектр завдань [2]. Але недоліками використання КА з високою просторовою розрізненістю є: низька оперативність (4–12 годин) оновлення інформації про район спостереження, велика радіометрична розрізненість знімків, складність їх передачі, зберігання й обробки. Вирішенням цієї проблеми є використання даних із систем ДЗЗ середньої та низької розрізненості, що мають відкриті коди передачі даних. Це дозволить оперативно виявляти зміни в обстановці, а потім деталізувати їх за допомогою даних із систем високої розрізненості.

Як зазначено вище, для виконання військових завдань важливою є просторова розрізненість. Виокремлюють цілу низку факторів, які можуть вплинути на неї, з-поміж них важливими є [3]: атмосферні умови (хмари та шторми, що охоплюють територію); просторова розрізненість на поверхні Землі (GSD); смуга огляду (FOV); розмиття в русі та геометричні спотворення; методи обробки даних; характеристики датчика.

Космічні знімки часто захмарені, це перешкоджає огляду земної поверхні. Дослідження, проведене інструментом MODIS показує, що загальна глобальна хмарність становить близько 67%, а частка хмар над сушею – близько 55% [4], відповідно, саме цей фактор має найбільший вплив на достовірність даних ДЗЗ.

Отже, видалення хмарності є важливим та актуальним науково-практичним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки такі атмосферні збурення, як хмари, – це регулярно повторювані погодні явища, то їх видалення або реконструкція зашумленої інформації є хоч і давньою, але й досі актуальною проблемою для космічного спостереження Землі. За останні десятиліття досліджень у галузі ДЗЗ з’явилася значна кількість робіт, присвячених цій проблемі.

У середньому на понад половину всіх оптичних спостережень, отриманих за допомогою космічних знімків земної поверхні, впливають хмари. Оскільки хмарне покриття серйозно перешкоджає поточному спостереженню Землі, автоматизована реконструкція зашумленої або покритої хмарами інформації є постійною проблемою в обробці сигналів і дистанційному зондуванні [5, 6]. Тому з метою удосконалення чинних програм (алгоритмів) ДЗЗ необхідно проаналізувати відомі підходи та методи для видалення хмарності з космічних знімків.

У [7] здійснено комплексний огляд традиційних методів. Видалення хмар стає незамінним етапом попередньої обробки даних ДЗЗ та має на меті реконструювати відсутню інформацію, спричинену цими природними явищами. Особлива увага приділяється пошуку способів виконання конкретного завдання видалення хмар в оптичних зображеннях. Методи, що базуються на традиційних підходах, можна

розділити на три основні групи: мультиспектральні, мультитемпоральні та методи “зафарбовування”, – а решта зазвичай є їх гібридною комбінацією.

**Мультиспектральні** підходи застосовують у разі серпанку та тонких перистих хмар, коли оптичні сигнали не блокуються повністю, але частково залежать від довжини хвилі поглинання та відображення. У таких випадках інформація про поверхню може бути відновлена за допомогою математичних [8] або фізичних моделей [9].

Перевага мультиспектральних методів – використання інформації з оригінального космічного знімка, що не потребує будь-яких додаткових даних. Але недоліком є те, що вони можуть бути результативними лише з напівпрозорими хмарами.

**Мультитемпоральні** підходи відновлюють хмарні космічні знімки шляхом інтеграції інформації з еталонних зображень, отриманих в умовах ясного неба [10]. Для цього також інколи використовують мультитемпоральні методи навчання каталогу. Мультитемпоральні дані також можуть надходити з різних датчиків різних супутників [11]. Ці методи є популярними через свою простоту та практичну значущість. Оскільки вони замінюють пошкоджені хмарні пікселі реальними безхмарними спостереженнями, то потребують вибору найсвіжіших, найменш хмарних спостережень з усіх доступних. Але є обмеження використання таких підходів: якщо в будь-який момент часу немає повністю безхмарних спостережень, то отриманий прогноз також міститиме захмарені пікселі. Тому в умовах швидких змін умов поверхні виникають проблеми через різницю в часі між космічним знімком, що реконструюється, та еталонним. Єдиний шлях усунення цього обмеження – збільшення частоти вибірки або часового діапазону спостереження, але хмарність може зберігатися протягом тривалого часу залежно від району та сезонності [4], тому найближче безхмарне спостереження може бути знайдене лише в застарілих та неактуальних даних.

Ранні спроби вирішити проблему видалення хмар на космічних знімках базувалися на припущенні, що захмарені ділянки та решта районів на знімку мають однакові статистичні та геометричні структури. Підходи “*корекції*” заповнюють пошкоджені фрагменти, використовуючи інформацію про поверхню з чітких частин того ж самого космічного знімка [12]. Такі методи не вимагають додаткових даних, але досягають хороших результатів лише в разі незначної хмарності. Щоб нівелювати цю проблему, процес вибору найбільш подібного пікселя для клонування часто ґрунтується на використанні допоміжних даних, наприклад, мультитемпоральних [13] або даних з радарів із синтезованою апертурою (SAR) [14]. Такі методи дають хороші результати, але мають підвищену складність через необхідність мультитемпоральних або мультисенсорних додаткових даних. Близькими до них є методи інтерполяції, які виділяють інформацію, приховану хмарами, завдяки просторовим інтерференціям від сусідніх або досить близьких пікселів без хмар. Такі методи базуються на методі найближчих сусідів [15] або кригінгу [16]. Їх недоліком є те, що хмари можуть безперервно покривати великі прилеглі райони, тоді припущення про близькість не ефективне.

На сучасному етапі розвитку технологій особливої популярності для вирішення проблеми хмарності набули методи, керовані даними, що використовують глибоке навчання. Проблеми, які виникають у ході застосування традиційних алгоритмів, можуть бути вирішені за допомогою навчання глибоких нейронних мереж (DNN), що мають великий потенціал для відновлення відсутньої інформації на космічних знімках ДЗЗ.

**Формулювання завдання дослідження.** Ескалація територіальних війн і конфліктів у всьому світі спонукає провідні країни зосереджувати зусилля на технологіях спостереження для національної безпеки. Дані з КА ДЗЗ можуть мати вирішальне значення для військових цілей. Як наслідок, у всьому світі зростає попит на технології ДЗЗ у військовій сфері. Але використання космічних знімків часто неможливе через вплив погодних та атмосферних умов. Отже, актуальним науково-практичним завданням є видалення хмарності на космічних знімках в умовах необхідного безперервного моніторингу (спостереження). **Метою** статті є аналіз підходів, які використовують для видалення хмарності на космічних знімках.

**Виклад основного матеріалу.** Для досягнення переваги у війні з російською федерацією Україна має акумулювати всі наявні внутрішньодержавні ресурси, а також максимально ефективно використовувати допомогу, яку надають партнери. Широке застосування сучасних інформаційних технологій у системі управління забезпечуватиме інформаційну перевагу над противником, що в результаті дозволить випереджати його в питаннях щодо ситуаційної обізнаності та ухваленні рішень, а в цілому забезпечить досягнення мети проведення операції в умовах позиційної війни. Ключовими складовими, які впливатимуть на досягнення переваги в ситуаційній обізнаності, є процеси організації зв'язку, розвідки, спостереження та рекогносцирування [1]. Космічні знімки часто є як допоміжним, так і основним інструментом для виконання різноманітних військових завдань (табл. 1) [2].

Таблиця 1

Вимоги до даних ДЗЗ для вирішення військових завдань

Завдання	Розмір об'єкта, м	Кількість смуг у межах спектрального діапазону (необхідне просторове розрізнення, м)	
		видимого	ІЧ
Розвідка транспортних мереж	30	4 (15)	1 (30)
Визначення характеристик ґрунту, картографування боліт для застосування військової техніки	30	4 (10)	2 (15)
Виявлення військових об'єктів й угруповань військової техніки	50	4 (5)	2 (10)
Складання карт місцевості	50	1 (15)	–
Розвідка населених пунктів, інженерних споруд, промислових об'єктів	60	1 (10)	1 (40)
Аналіз снігового та крижаного покривів	100	5 (30)	3 (50)
Визначення стану хмарного покриву в разі застосування засобів видової розвідки	200	1 (100)	1 (50)
Аналіз результатів завдання ударів по об'єктах противника	300	1 (50)	1 (100)

Не лише державні, але й приватні компанії запускають власні КА ДЗЗ, у такий спосіб сприяючи зростанню конкуренції та розвитку інновацій (рис. 1). Усе більше приватних компаній відкривають доступ до власних космічних даних, це створює умови для їх використання у військових цілях. Застосування комплексованих даних із відкритих джерел від різних систем ДЗЗ – один із шляхів покращення ситуаційної обізнаності.

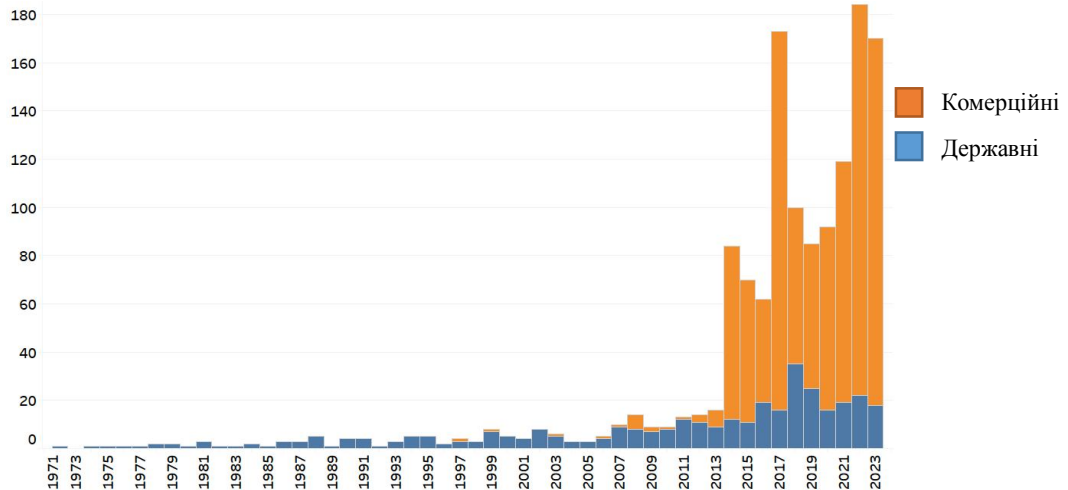


Рис. 1. Зростання кількості запусків КА ДЗЗ (станом на 25.10.2023)

За останні роки кількість КА, що ведуть спостереження Землі з космосу в різних діапазонах, значно зростає. Згідно з [17], лідерами за кількістю лишаються США (661), Китай (318), рф (45), Аргентина (43), Індія (42), Фінляндія (37), Японія (29) та Франція (29).

Таблиця 2

Дані про хмарність у найбільших містах України за 2023 рік

	01/23	02/23	03/23	04/23	05/23	06/23	07/23	08/23	09/23	10/23	11/23	12/23
Вінниця	83	63	55	88	60	48	45	35	38	83	87	78
Дніпро	77	77	48	92	85	42	27	25	60	37	72	85
Донецьк	73	87	62	90	63	60	20	20	50	60	83	82
Житомир	95	58	77	83	25	50	50	40	38	80	65	83
Запоріжжя	67	65	40	93	58	52	28	10	37	52	75	85
Івано-Франківськ	97	70	63	85	62	48	42	23	52	83	92	77
Київ	77	52	65	83	45	67	52	37	43	93	42	90
Кропивницький	82	70	53	72	53	40	22	45	48	50	72	83
Луганськ	62	93	82	78	55	55	32	37	47	72	67	78
Луцьк	83	67	73	98	43	47	62	27	57	73	88	90
Львів	77	82	63	83	33	30	60	52	48	78	90	88
Миколаїв	73	45	52	80	52	32	30	25	37	47	72	82
Одеса	73	28	37	88	33	30	23	30	35	40	72	77
Полтава	50	73	65	82	82	60	38	47	62	58	80	87
Рівне	97	73	75	100	55	52	52	43	53	90	78	95
Сімферополь	42	42	75	73	70	45	32	23	38	58	67	65
Суми	68	78	73	78	60	70	42	45	55	72	88	93
Тернопіль	97	58	82	97	50	55	68	42	37	77	82	88
Ужгород	82	60	72	78	60	37	53	47	33	85	73	73
Харків	55	75	83	75	68	73	32	42	48	58	85	92
Херсон	67	43	32	83	60	43	33	37	27	37	82	68
Хмельницький	93	58	67	97	37	58	73	42	37	90	85	72
Черкаси	87	53	62	67	52	38	18	30	32	88	75	75
Чернівці	83	60	68	88	45	55	57	33	42	65	95	78
Чернігів	93	77	80	77	60	67	73	47	60	70	58	95
<b>Україна</b>	<b>77</b>	<b>64</b>	<b>64</b>	<b>84</b>	<b>55</b>	<b>50</b>	<b>43</b>	<b>35</b>	<b>45</b>	<b>68</b>	<b>77</b>	<b>82</b>
Переважно малохмарно	0	12	24	Малохмарно			Мінлива хмарність			Хмарно		
				25	35	44	45	57	69	70	85	100

В Україні середньорічний показник хмарності становить близько 62%. У табл. 2 проаналізовано дані з порталу [18] про хмарність у найбільших містах упродовж 2023 року (для аналізу обрано середні значення хмарності, зафіксовані о 14:00 1-го, 5-го, 10-го, 15-го, 20-го та 25-го числа щомісяця).

Моделі на основі DNN можна навчити справлятися з різними типами хмар та іншими залишковими атмосферними умовами.

Базисом для підходів, що ґрунтуються на згорткових нейронних мережах (CNN), стала суть процесу видалення хмарності, що полягає в реконструюванні високоякісного чистого зображення з низькоякісного зашумленого аналога. У [19] запропоновано метод, де використовується просторово-часово-спектральна згорткова нейронна мережа (CNN) для відновлення даних Landsat TM.

Більш сучасною архітектурою CNN є умовно генеративна змагальна мережа (сGAN). У [21] модель сGAN навчена видаляти змодельовані хмари із зображень видимого (RGB) спектра з Worldview-2, використовуючи зображення з ближнього інфрачервоного (NIR) спектра як допоміжні дані. Модель McGAN [20] – це генеративна архітектура з основою  $pix2pix$  [21], що зіставляє захмарене зображення з видимого та ближнього інфрачервоного спектральних діапазонів.

Подальший розвиток сGAN – Cycle-GAN не потребує для навчання парних хмарно-вільних космічних знімків [22].

Незважаючи на потужні генеративні можливості, недоліком сGAN є нестабільність навчання та прогнозування в разі наявних неякісних вхідних даних (наприклад, космічні знімки з великим покриттям хмар).

Альтернативою GAN є мережа [23], яка застосовує залишкову архітектуру для видалення серпанку. Але є певна межа, до якої такий підхід об'єднання суто оптичних даних (включаючи додатковий ближній інфрачервоний діапазон) буде ефективним у відновленні захмарених знімків.

Наведені вище дослідження дають перспективні результати, але використані набори даних дуже обмежені. Важливою проблемою розглянутих підходів є потреба у великих наборах реальних даних. Також варто зазначити, що оцінювання здатності мереж видаляти хмарність на нових космічних знімках (наприклад, знімках районів, які не використовувалися в ході навчання моделі) практично неможливе.

Спільним недоліком розглянутих вище підходів є їх зосередженість на вузьких ділянках поверхні, що становлять інтерес, а також залежність від синтезованих зразків хмарності, що унеможлиблює узагальнення на більш розгалужені області та реальні умови. Тобто щоразу модель потрібно розробляти заново для кожного регіону, знання про один район не можуть бути перенесені на інший.

Тому особливої уваги заслуговують підходи, що ґрунтуються на злитті SAR та оптичних даних. У [24] запропоновано крос-модальний кореляційний підхід, що рекомендує “зафарбовувати” хмарні пікселі відповідно до тих безхмарних, чиї одночасно зафіксовані дані є найближчими до вимірювань SAR пікселів, які підлягають відновленню. У [25] об'єднуються радіолокаційні дані з інформацією з допоміжного оптичного зображення за допомогою методу найближчої спектральної відповідності [26]. Хоча оптичні й радіолокаційні датчики вимірюють різні величини, і тому їх важко

пов'язати один з одним, це стало базисом для подальшого розвитку підходів глибокого навчання з метою об'єднання даних SAR в оптичну область і злиття даних із декількох датчиків [27].

Оскільки SAR є інваріантним до умов денного світла і стійким до атмосферного шуму [28], але відрізняється за вимірюваними величинами від оптичних сенсорів, то виникає нова проблема подолання розриву між їх модальностями. Хоча підхід об'єднання оптичних та SAR-даних демонструє можливість виконання завдання з видалення хмарності зі знімків, не всі спектральні властивості земного покриву можуть бути виведені з відповідних радіолокаційних вимірювань, що фундаментально обмежує метод SAR2OPT [29].

Наприклад, у [30] використано підхід для створення безхмарних зображень завдяки прямому злиттю SAR та оптичних даних за допомогою cGAN. Аналогічна модель, запропонована в [31], поєднує дані з оптичних та радіолокаційних датчиків. Але такий підхід часто обмежується простим початковим нагромадженням ознак, вилучених із інформації, отриманої від різних джерел, із подальшим їх злиттям.

Важливою частиною згаданих вище мереж є не тільки їхня архітектура та поправки, зроблені для адаптації до обробки супутникових знімків, але й дані, на яких вони були навчені та протестовані. Зокрема, наявність значних обсягів специфічної інформації набула все більшого значення з появою DNN. Наприклад, відсутність достатньої кількості загальнодоступних даних для навчання моделей значно ускладнює їх порівняння. Тому за таких умов деякі розглянуті моделі навчали на знімках, що містять синтетичні хмари, згенеровані за допомогою шуму Перліна [32], альфа-змішування або за допомогою моделювання Релея, які не завжди відповідають фізичним та спектральним характеристикам реальних хмар.

Винятком із цих обмежень є набори даних RICE [33], які містять парні (хмарні та безхмарні) реальні космічні знімки, а також космічні спостереження, отримані за допомогою Google Earth або із супутника Landsat-8. Однак усі дані, зібрані на вузьких ділянках, не надають можливості для розв'язання проблеми видалення хмарності й потребують подальшої роботи.

Дослідження, у яких запропоновані нейронні мережі для видалення різночасових хмар, спрямовані на видалення й інших дефектів [33]. Для цього використано залишкову архітектуру із сіамською обробкою супутникових знімків, особливості якої складаються та інтегруються в реконструйоване зображення. Також у [34] розглянуто мережу для двоетапного видалення хмар, яка реконструює інформацію про хмарність на одному супутниковому знімку шляхом використання даних з іншого безхмарного оптичного зображення й коригування їх відповідно до структури та спектра отриманого зображення.

Використання можливостей SAR-даних для видалення хмар передбачає два аспекти. Перший – глобальне злиття, яке керує взаємозв'язком між усіма локальними оптичними вікнами, щоб підтримувати структуру відновленої ділянки відповідно до решти безхмарних областей. Другий – локальне злиття, що передає додаткову інформацію, вбудовану в зображення SAR, яка відповідає хмарним районам, для створення надійних деталей текстури відсутніх частин, і використовує динамічну фільтрацію, щоб зменшити погіршення продуктивності, спричинене спекл-шумом. Такий підхід може створювати високоякісні зображення без хмар і перевершувати найсучасніші алгоритми їх видалення.



Відповідно, узагальнена схема моделі видалення хмарності на космічних знімках буде мати такий вигляд (рис. 2), де на вхід енкодера подаються пари оптичних та SAR космічних знімків, а в результаті навчена модель реконструює захмарене оптичне зображення.

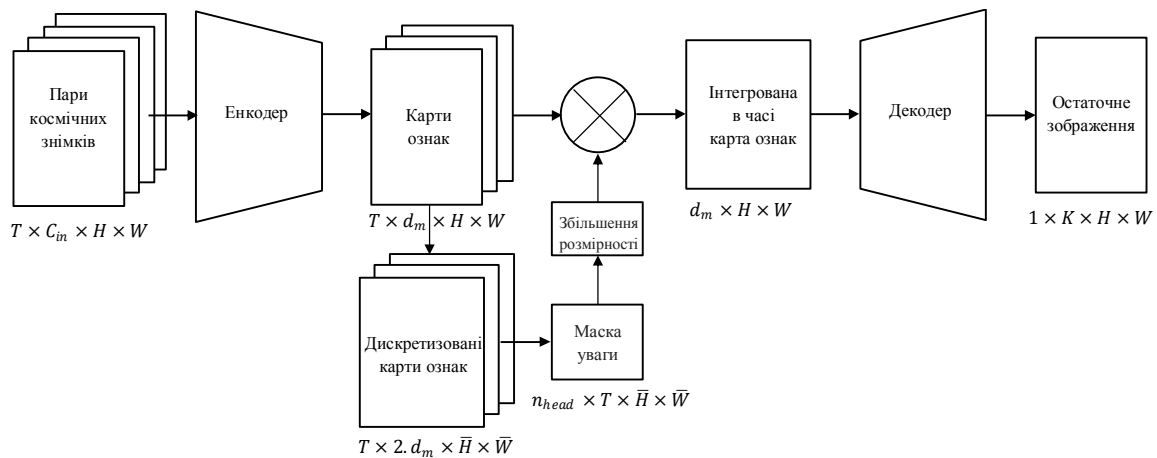


Рис. 2. Модель формування безхмарного оптичного зображення

Обраний підхід проєктує хмарний вхідний часовий ряд пар космічних знімків  $T \times C_m \times H \times W$  на єдине безхмарне оптичне зображення  $1 \times K \times H \times W$ .

Модель складається з трьох основних частин, які застосовуються вздовж головної магістралі блоків згорткової мережі, тобто оброблення карт ознак із повнорозмірним вхідним зображенням.

Енкодер паралельно обробляє всі зображення часового ряду  $T$ . Потім часовий агрегатор, використовуючи підхід на базі механізму уваги, обраховує відповідну маску уваги  $n_{head} \times T \times \bar{H} \times \bar{W}$  до дискретизованих карт ознак  $T \times 2 \cdot d_m \times \bar{H} \times \bar{W}$ , збільшуючи їх до повної розмірності за допомогою білінійної інтерполяції. Карти ознак слугують для агрегування послідовності спостережень. Інтегрована в часі карта ознак  $d_m \times H \times W$  обробляється блоком декодера. Для кожного каналу, що прогнозує реконструкцію зображення, застосовується сигмоїдальна функція для стиснення вихідних даних до визначеної розмірності. У результаті реконструюється безхмарне зображення  $1 \times K \times H \times W$ .

**Висновки.** Досвід ведення російсько-української війни вимагає якісно нового інформаційного забезпечення Збройних Сил України. Основним шляхом його удосконалення має стати використання на комерційній основі КА середнього розрізнення, які мають можливість проведення багатоспектрального (гіперспектрального) знімання. Захмареність космічних знімків заважає цілковито використовувати дані ДЗЗ (або серйозно впливає на часову та просторову доступність спостережень на поверхні Землі). За результатами аналізу можливостей даних ДЗЗ середнього просторового розрізнення та порівняння методів формування безхмарного оптичного зображення відібрано підхід, що ґрунтується злитті SAR та оптичних даних для використання синергетичних властивостей у ході реконструкції зображень.

Отже, наукова новизна отриманих результатів полягає в обґрунтуванні перспективності комплексування оптичних даних та даних з радарів із синтезованою апертурою для виконання завдання щодо видалення хмарності на космічних знімках.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методичного апарату видалення хмарності з багатоспектральних космічних знімків із використанням даних ДЗЗ середнього просторового розрізнення.

### **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. The commander-in-chief of Ukraine's armed forces on how to win the war // The Economist. URL: <https://www.economist.com/by-invitation/2023/11/01/the-commander-in-chief-of-ukraines-armed-forces-on-how-to-win-the-war> (last accessed: 29.11.2023).
2. Ковбасюк С. В., Каневський Л. Б., Романчук М. П. Шляхи удосконалення інформаційного забезпечення Збройних Сил України при використанні даних дистанційного зондування Землі середнього просторового розрізнення // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2017. Вип. 14. С. 105–115.
3. Types of Resolution in Remote Sensing // LIDAR and RADAR. URL: <https://lidarandradar.com/resolution-in-remote-sensing-and-its-types/> (last accessed: 29.11.2023).
4. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites / M. King, S. Platnick, W. Menzel, S. Ackerman, P. Hubanks // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2013. № 51 (7). P. 3826–3852. <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2012.2227333>
5. Schowengerdt R. Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing. (3d ed.). Burlington: Elsevier, 2007. 560 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-369407-2.x5000-1>
6. Rees W. G. Physical Principles of Remote Sensing. (3d ed.). Cambridge University Press, 2012. 336 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139017411>
7. Missing Information Reconstruction of Remote Sensing Data: A Technical Review / H. Shen et al. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2015. Vol. 3, № 3. P. 61–85. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2015.2441912>
8. Thin cloud removal from optical remote sensing images using the noise-adjusted principal components transform / M. Xu et al. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. Vol. 149. P. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.025>
9. Lv H., Wang Y., Shen Y. An empirical and radiative transfer model based algorithm to remove thin clouds in visible bands // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 179. P. 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.034>
10. Nonlocal Tensor Completion for Multitemporal Remotely Sensed Images' inpainting / T.-Y. Ji et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56, № 6. P. 3047–3061. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2790262>
11. Cloud removal in remote sensing images using nonnegative matrix factorization and error correction / X. Li et al. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. Vol. 148. P. 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.013>

12. A Sparse Dictionary Learning-Based Adaptive Patch Inpainting Method for Thick Clouds Removal from High-Spatial Resolution Remote Sensing Imagery / F. Meng et al. // *Sensors*. 2017. Vol. 17, № 9. P. 2130. <https://doi.org/10.3390/s17092130>
13. Cloud removal for remotely sensed images by similar pixel replacement guided with a spatio-temporal MRF model / Q. Cheng et al. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.015>
14. Removal of Optically Thick Clouds from Multi-Spectral Satellite Images Using Multi-Frequency SAR Data / R. Eckardt et al. // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5, № 6. P. 2973–3006. <https://doi.org/10.3390/rs5062973>
15. Siravenha A., Sousa D., Bispo A., Pelaes E. Evaluating Inpainting Methods to the Satellite Images Clouds and Shadows Removing // *Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition (SIP, 2011)*. *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 260. Springer, Berlin, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27183-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27183-0_7)
16. Kriging interpolation method and its application in retrieval of MODIS aerosol optical depth / C. Yu et al. // *19th International Conference on Geoinformatics*, Shanghai, China. June 24–26, 2011. <https://doi.org/10.1109/geoinformatics.2011.5981052>
17. Land Remote Sensing Satellites. // *Science for a changing world*. URL: <https://www.usgs.gov/calval/land-remote-sensing-satellites> (last accessed: 29.11.2023).
18. Ventusky - Weather Forecast Maps. Ventusky - Wind, Rain and Temperature Maps. URL: <https://www.ventusky.com/> (last accessed: 29.11.2023).
19. Missing data reconstruction in remote sensing image with a unified spatial–temporal–spectral deep convolutional neural network / Q. Zhang et al. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2018. Vol. 56, № 8. P. 4274–4288. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2810208>
20. Filmy cloud removal on satellite imagery with multispectral conditional Generative Adversarial Nets / K. Enomoto, K. Sakurada, W. Wang et al. // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, arXiv: 1710.04835. 2017. P. 1533–1541. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.197>
21. Isola P., Zhu J., Zhou T., Efros A. Image-to-image translation with conditional adversarial networks // *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 1125–1134. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2017.632>
22. Remote Sensing Object Detection Meets Deep Learning: A metareview of challenges and advances / X. Zhang et al. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2023 Vol. 11, Iss. 4, P. 8–44. <http://dx.doi.org/10.1109/mgrs.2023.3312347>
23. Dehazing for multispectral remote sensing images based on a convolutional neural network with the residual architecture / M. Qin, F. Xie, W. Li et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. № 11 (5). P. 1645–1655. <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2018.2812726>
24. Hoan N., Tateishi R. Cloud Removal of Optical Image Using SAR Data for ALOS Applications. Experimenting on Simulated ALOS Data // *Journal of remote sensing*. 2009. Iss. 29. P. 410–417.
25. Removal of Optically Thick Clouds from Multi-Spectral Satellite Images Using Multi-Frequency SAR Data / R. Eckardt et al. // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5, № 6. P. 2973–3006. <https://doi.org/10.3390/rs5062973>

26. Meng Q., Borders B., Cieszewski C., Madden M. Closest spectral fit for removing clouds and cloud shadows // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2009. № 75 (5). P. 569–576. <http://dx.doi.org/10.14358/pers.75.5.569>
27. Schmitt M., Zhu. X. Data fusion and remote sensing: An ever-growing relationship // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2016. № 4 (4). P. 6–23. <http://dx.doi.org/10.1109/mgrs.2016.2561021>
28. Bamler R. Principles of synthetic aperture radar // *Surveys in Geophysics*. 2020. № 21 (2–3). P. 147–157.
29. SAR-to-optical image translation using supervised cycle-consistent adversarial networks / L. Wang, X. Xu, Y. Yu et al. // *IEEE Access*. 2019. № 7. P. 129136–129149. <https://doi:10.1109/ACCESS.2019.2939649>
30. Synthesis of Multispectral Optical Images From SAR/Optical Multitemporal Data Using Conditional Generative Adversarial Networks / J. D. Bermudez et al. // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2019. Vol. 16, № 8. P. 1220–1224. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2019.2894734>
31. Li W., Li Y., Chan J. Thick cloud removal with optical and SAR imagery via convolutional-mapping-deconvolutional network // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. № 58 (4). P. 2865–2879. <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2019.2956959>
32. Perlin K. Improving noise // *In Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. 2002. P. 681–682.
33. A remote sensing image dataset for cloud removal / D. Lin, G. Xu, X. Wang et al. // *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. arXiv:1901.00600. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.00600>
34. Thick clouds removal from multitemporal ZY-3 satellite images using deep learning / Y. Chen, L. Tang, X. Yang et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019. № 13. P. 143–153. <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2019.2954130>

Стаття надійшла до редакції 20.12.2023.

## REFERENCES

1. The commander-in-chief of Ukraine's armed forces on how to win the war. (n.d.). *The Economist*. Retrived from <https://www.economist.com/by-invitation/2023/11/01/the-commander-in-chief-of-ukraines-armed-forces-on-how-to-win-the-war>
2. Kovbasiyuk, S. V., Kanevsky, L. B., & Romanchuk, M. P. (2017). Shliakhy udoskonalennia informatsiinoho zabezpechennia Zbroinykh Syl Ukrainy pry vykorystanni danykh dystantsiinoho zonduvannia Zemli serednoho prostoro-vo ho rozrznennia [Study of Ways for Improving Information Support of the Armed Forces of Ukraine Using Data Distal Sounding of the Earth of Space Models of Middle Space Distribution]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, Iss. 14, 105–115 [in Ukrainian].

3. Types of Resolution in Remote Sensing. (n.d.). *LIDAR and RADAR*. Retrived from <https://lidarandradar.com/resolution-in-remote-sensing-and-its-types/>
4. King, M., Platnick, S., Menzel, W., Ackerman, S., & Hubanks, P. (2013). Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, № 51 (7), 3826–3852. <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2012.2227333>
5. Schowengerdt, R. (2007). *Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing*. (3d ed.). Burlington: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-369407-2.x5000-1>
6. Rees, W. G. (2012). *Physical Principles of Remote Sensing*. (3d ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139017411>
7. Shen, H. et al. (2015). Missing Information Reconstruction of Remote Sensing Data: A Technical Review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, Vol. 3, № 3, 61–85. <https://doi.org/10.1109/mgrs.2015.2441912>
8. Xu, M. et al. (2019). Thin cloud removal from optical remote sensing images using the noise-adjusted principal components transform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 149, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.025>
9. Lv, H., Wang, Y., & Shen, Y. (2016). An empirical and radiative transfer model based algorithm to remove thin clouds in visible bands. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 179, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.034>
10. Ji, T.-Y. et al. (2018). Nonlocal Tensor Completion for Multitemporal Remotely Sensed Images' Inpainting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 56, № 6, 3047–3061. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2790262>
11. Li, X. et al. (2019). Cloud removal in remote sensing images using nonnegative matrix factorization and error correction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 148, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.013>
12. Meng, F. et al. (2017). A Sparse Dictionary Learning-Based Adaptive Patch Inpainting Method for Thick Clouds Removal from High-Spatial Resolution Remote Sensing Imagery. *Sensors*, Vol. 17, № 9, 2130. <https://doi.org/10.3390/s17092130>
13. Cheng, Q. et al. (2014). Cloud Removal for Remotely Sensed Images by Similar Pixel Replacement Guided with a Spatio-temporal MRF Model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 92, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.015>
14. Eckardt, R. et al. (2013). Removal of Optically Thick Clouds from Multi-Spectral Satellite Images Using Multi-Frequency SAR Data. *Remote Sensing*, Vol. 5, № 6, 2973–3006. <https://doi.org/10.3390/rs5062973>
15. Siravenha, A., Sousa, D., Bispo, A., & Pelaes, E. (2011). Evaluating Inpainting Methods to the Satellite Images Clouds and Shadows Removing. *Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition (SIP, 2011). Communications in Computer and Information Science*, Vol. 260. Springer, Berlin. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27183-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27183-0_7)
16. Yu, C. et al. (2011). Kriging Interpolation Method and its Application in Retrieval of MODIS Aerosol Optical Depth. In *19th International Conference on Geoinformatics*. Shanghai, China, June 24–26, 2011. <https://doi.org/10.1109/geoinformatics.2011.5981052>
17. Land Remote Sensing Satellites. (n.d.). *Science for a changing world*. Retrived from <https://www.usgs.gov/calval/land-remote-sensing-satellites>

18. Ventusky – *Weather Forecast Maps. Ventusky – Wind, Rain and Temperature Maps.* (n.d.). Retrived from <https://www.ventusky.com/>
19. Zhang, Q. et al. (2018). Missing Data Reconstruction in Remote Sensing Image with a Unified Spatial-temporal-spectral Deep Convolutional Neural Network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 56, № 8, 4274–4288. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2810208>
20. Enomoto, K., Sakurada, K., & Wang, W. et al. (2017). Filmy Cloud Removal on Satellite Imagery with Multispectral Conditional Generative Adversarial Nets. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, arXiv: 1710.04835, (pp. 1533–1541). <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.197>
21. Isola, P., Zhu, J., Zhou, T., & Efros, A. (2017). Image-to-image Translation with Conditional Adversarial Networks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. (pp. 1125–1134). <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2017.632>
22. Zhang, X. et al. (2023). Remote Sensing Object Detection Meets Deep Learning: A Metareview of Challenges and Advances. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, Vol. 11, Iss. 4, 8–44. <http://dx.doi.org/10.1109/mgrs.2023.3312347>
23. Qin, M., Xie, F., & Li, W. et al. (2018). Dehazing for Multispectral Remote Sensing Images Based on a Convolutional Neural Network with the Residual Architecture. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, № 11 (5), 1645–1655. <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2018.2812726>
24. Hoan, N., & Tateishi, R. (2009). Cloud Removal of Optical Image Using SAR Data for ALOS Applications. Experimenting on Simulated ALOS Data. *Journal of Remote Sensing*, Iss. 29, 410–417.
25. Eckardt, R. et al. (2013). Removal of Optically Thick Clouds from Multi-Spectral Satellite Images Using Multi-Frequency SAR Data. *Remote Sensing*, Vol. 5, № 6, 2973–3006. <https://doi.org/10.3390/rs5062973>
26. Meng, Q., Borders, B., Cieszewski, C., & Madden, M. (2009). Closest Spectral Fit for Removing Clouds and Cloud Shadows. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, № 75 (5), 569–576. <http://dx.doi.org/10.14358/pers.75.5.569>
27. Schmitt, M., & Zhu, X. (2016). Data fusion and remote sensing: An ever-growing relationship. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, № 4 (4), 6–23. <http://dx.doi.org/10.1109/mgrs.2016.2561021>
28. Bamler, R. (2020). Principles of synthetic aperture radar. *Surveys in Geophysics*, № 21 (2–3), 147–157.
29. Wang, L., Xu, X., & Yu, Y. et al. (2019). SAR-to-optical Image Translation Using Supervised Cycle-consistent Adversarial Networks. *IEEE Access*, № 7, 129136–129149. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2019.2939649>
30. Bermudez, J. D. et al. (2019). Synthesis of Multispectral Optical Images From SAR/Optical Multitemporal Data Using Conditional Generative Adversarial Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 16, № 8, 1220–1224. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2019.2894734>
31. Li, W., Li, Y., & Chan, J. (2019). Thick Cloud Removal with Optical and SAR Imagery Via Convolutional-Mapping-Deconvolutional Network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58 (4), 2865–2879. <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2019.2956959>

32. Perlin, K. (2002). Improving noise. In *Proceedings of the Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. (pp. 681–682).
33. Lin, D., Xu, G., & Wang, X. et al. (2019). A Remote Sensing Image Dataset for Cloud Removal. *Computer Vision and Pattern Recognition*. arXiv:1901.00600. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.00600>
34. Chen, Y., Tang, L., Yang, X. et al. (2019). Thick Clouds Removal from Multitemporal ZY-3 Satellite Images Using Deep Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, № 13, 143–153. <http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2019.2954130>

**O. M. Naumchak**

## **ANALYSIS OF APPROACHES TO CLOUD REMOVAL ON REMOTE SENSING IMAGES**

*The modern development of space technologies and remote sensing creates unique opportunities for solving problems in many areas, including the military. Remote sensing imagery often plays a key role in decision-making at all levels of military command, so one of the most important tasks in this context is cloud detection and extraction. This is an important stage of remote sensing data processing aimed at reconstructing information hidden by clouds. The article is devoted to the analysis of different approaches to cloud removal and improvement of the data quality. The approaches based on the use of various image processing algorithms (traditional approaches) have certain limitations associated with the frequent loss of useful information. Special attention is paid to deep learning methods, which have gained popularity in solving cloud removal problems. Deep Neural Networks show great potential for recovering information on satellite images that is hidden by clouds. This paper discusses various Deep Neural Networks architectures, such as convolutional neural networks, conditional generative adversarial networks, and their modifications. Their advantages and disadvantages are also considered. The use of such methods is more accurate and efficient compared to traditional image processing methods, as neural networks can adapt to various conditions and types of images. The analyzed disadvantages of fusing purely optical data led to the conclusion that the best approach to solving the problem of removing clouds from satellite images would be to combine optical and radar data. Despite the complexity of such an approach, it can show the greatest efficiency in solving the problem considered in this article. The challenges and prospects for further improvement of cloud removal methods on satellite images are considered. In particular, the use of artificial intelligence algorithms for automatic cloud detection and removal, as well as the need to create standardized methods for comparing and evaluating the effectiveness of different approaches.*

**Keywords:** *satellite imagery; remote sensing; cloud cover; neural networks.*

І. А. Беспалко, Л. М. Наумчак, Д. В. Пекарєв

## ПРОЄКТУВАННЯ МАКЕТА СИСТЕМИ НЕЧІТКОЇ ЛОГІЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ У ПРОЦЕСІ АНАЛІЗУ КОСМІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ

*Одним з етапів аналізу космічної обстановки є проведення класифікації космічних апаратів. Наявні підходи до вирішення зазначеного завдання не повністю враховують особливості ознак космічних апаратів та класифікують їх частково, лише за окремими ознаками. Тому для реалізації комплексного підходу до вирішення цієї проблеми розглянуто можливість застосування апарату нечіткої логіки та визначено основні етапи виконання поставленого завдання з використанням теорії нечітких множин.*

*На початкових етапах виокремлюють ознаки, які дозволяють провести класифікацію космічних апаратів. Їх отримують з аналізу апріорної та апостеріорної інформації в числовому, категорійному або лінгвістичному вигляді. У подальшому визначаються лінгвістичні змінні, їх терми саме для тих ознак, що можуть бути надані в лінгвістичному вигляді, та будуються їх функції належності нечітких множин.*

*Наступним кроком є формування бази нечітких продукційних правил нечіткої логічної системи класифікації космічних апаратів у процесі аналізу космічної обстановки, що є базисом для розроблення алгоритму та програмного забезпечення її реалізації.*

*Окреслено подальші кроки вирішення завдання класифікації космічних апаратів на основі нечіткої логіки, що полягають: у знаходженні ступенів істинності найпростіших тверджень за заданими значеннями вхідних параметрів; в обчисленні істинності передумов правил; у визначенні функцій належності кожного з висновків для загальної лінгвістичної змінної; в об'єднанні функцій належності через побудову їх максимуму; в отриманні конкретного значення вихідної змінної.*

*Запропонований підхід можливо використати для вирішення завдання комплексної класифікації космічних апаратів з урахуванням більшості різнорідних ознак.*

**Ключові слова:** класифікація космічних апаратів; ознаки класифікації; лінгвістичні змінні; функція належності; нечітке продукційне правило.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Склад космічних систем провідних держав світу, що здійснюють космічну діяльність, сьогодні активно змінюється і нарощується [1]. Постійно зростає кількість космічних апаратів (КА), покращуються їх функціональні можливості у зв'язку з розвитком технологічної бази. Тільки за листопад 2023 року здійснено 15 пусків ракет-носіїв та виведено на навколосемну орбіту 237 КА різного призначення.

Із введенням правового режиму воєнного стану в Україні з 24 лютого 2022 року космічна підтримка та космічна ситуаційна обізнаність (аналіз космічної обстановки), як її складова, стали актуальною та нагальною потребою в процесі планування діяльності суб'єктів національної безпеки й оборони, що вимагає оперативної та чіткої класифікації КА саме за призначенням [1].

© І. А. Беспалко, Л. М. Наумчак, Д. В. Пекарєв, 2023



Основними причинами необхідності класифікації КА за призначенням є: визначення можливостей щодо застосування їх бортової спеціальної апаратури; уникнення помилкових рішень на підставі даних щодо можливого застосування КА противником;

підвищення ефективності застосування військ (сил) за рахунок використання об'єктивних даних про КА противника та проведення відповідних заходів запобігання їх впливу тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню класифікації об'єктів різного характеру присвячено багато наукових праць. За напрямом, що розглядається, закордонними дослідниками було запропоновано алгоритм зворотного поширення штучних нейронних мереж для класифікації КА глобальної навігаційної системи (GPS) та розрахунку коефіцієнтів геометричної точності їх позиціонування [2], глибоке та багатоядерне навчання на основі рекурентних і згорткових нейронних мереж для синхронної ідентифікації форми та положення об'єктів на геостационарній орбіті [3] тощо. Уніфікована класифікація КА на основі маси та розміру подається як один з інструментів для визначення параметрів ракет-носіїв і вартості виведення КА на орбіти [4].

У роботах українських учених розглянуто варіанти класифікації КА на основі аналізу їх ознак та систематизації інформації про космічні системи [5–7] та приділяється увага проблематиці вибору КА для використання цільової інформації з них [8–10].

Отже, у сучасних наукових працях відображені результати досліджень класифікації КА за окремими ознаками, а завдання класифікації за комплексом ознак не розглядається.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є розроблення бази нечітких продукційних правил нечіткої логічної системи класифікації КА з наявної апріорної інформації з планів їх запусків та апостеріорної інформації про них.

У разі, коли немає чіткої межі, що розділяє класи (наприклад, різнорідні ознаки притаманні декільком класам), підхід із використанням нечіткої логіки дозволить класифікувати КА за комплексом різнорідних ознак із певною часткою істинності [11–13].

### **Виклад основного матеріалу**

З метою підвищення достовірності визначення призначення КА та їх належності до певного класу запропоновано використати математичний апарат теорії нечітких множин для проведення їх класифікації за апріорною та апостеріорною інформацією, що може бути отримана з відкритих джерел.

Початковим етапом у вирішенні завдання класифікації КА з використанням теорії нечітких множин є визначення їх ознак, які будуть використовуватися із цією метою. Вони можуть бути числовими, категорійними або лінгвістичними.

Завдання класифікації даних дозволяє вирішити система нечіткого виведення (англ. fuzzy inference system), що базується на алгоритмі отримання нечітких висновків на основі нечітких передумов із використанням понять нечіткої логіки [11]. Процес нечіткого виведення поєднує основні концепції теорії нечітких множин: функції належності, лінгвістичні змінні, нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації та нечітку композицію [13].

Загальна схема роботи системи нечіткого виведення подана на рис. 1.

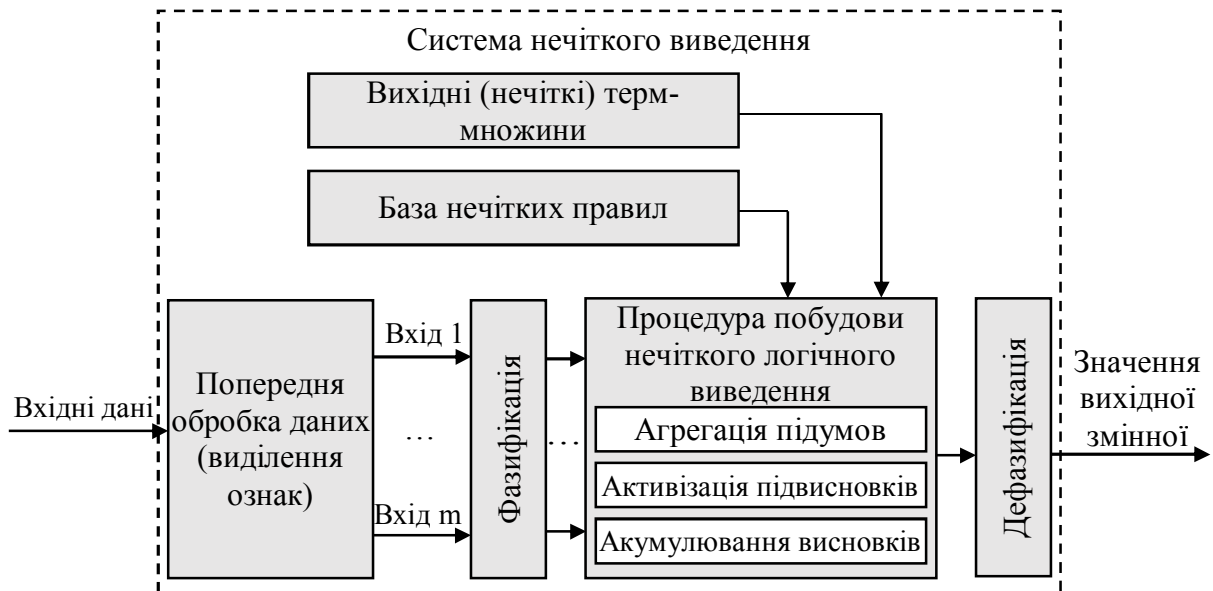


Рис. 1. Основні етапи нечіткого виведення

Системи нечіткого виведення призначені для перетворення значень вхідних змінних у вихідні змінні на основі використання нечітких правил. Для цього системи нечіткого виведення повинні містити базу нечітких правил та вихідні терм-множини [11–13].

Отже, основними етапами нечіткого виведення є (див. рис. 1) [11–13]: фазифікація вхідних змінних; агрегація підумов в нечітких правилах; активізація або композиція підвисновків у нечітких правилах; акумуляція висновків нечітких правил.

У цілому, класифікація об'єктів на основі нечіткої логіки є складним процесом та вимагає великої кількості вхідних даних, але основною перевагою застосування запропонованого підходу є можливість використовувати інформацію, яка може бути нечіткою, але все ж корисною для прийняття рішень.

Результатом першого етапу є фазифікація вхідних змінних – встановлення відповідності між конкретним (зазвичай числовим) значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виведення і значенням функції належності відповідного їй терму вхідної лінгвістичної змінної. Після чого для всіх вхідних змінних визначаються конкретні значення функцій належності  $\mu(x)$  за кожним із лінгвістичних термів, використаних у передумовах бази правил системи нечіткого виведення [11–13]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, a < x < b \\ 0, b \leq x \end{cases} \quad (1)$$

або

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, a < x < b \\ 1, b \leq x \end{cases}, \quad (2)$$

де  $x$  – значення окремої вхідної змінної;

$a, b$  – граничні значення терму нечіткої множини.

Наступний етап нечіткого виведення – агрегація підумов у нечітких правилах, яка є необхідною умовою для подальшої програмної реалізації нечіткої логічної системи класифікації КА, що базується на описі кожного класу певною кількістю ознак, визначенням їх значень та їх лінгвістичних змінних.

Для розв’язання задачі класифікації КА використаємо нечітку систему типу “багато входів – один вихід”, що досить поширена в моделюванні систем керування, для яких через велику складність і неповноту даних неможливо або недоцільно будувати моделі в рамках класичної теорії [12–13].

Побудова системи нечітких правил здійснюється шляхом формування за кожним прикладом навчальної вибірки нечіткого правила  $P_i (i = 1, \dots, n)$  такого вигляду:

$$P_i : \text{ЯКЩО } v_1 = V_{1i} \text{ ТА...ТА } v_k = V_{ki} \text{ ТА...ТА } v_n = V_{ni}, \text{ ТО } w_i = W_i, \quad (3)$$

де  $v_k (k = 1, \dots, n)$  – найменування ознак об’єкта класифікації,  $v_k \in V_k$ ;

$V_k$  – область визначення ознак;

$w$  – номер класу,  $w \in W$ ;

$W$  – область визначення номерів класів;

$V_{ki}$  – лінгвістичні терми, що описують нечіткі множини з функціями належності.

Наведене правило нечіткого логічного виведення моделює мислення людини і дає змогу запропонувати рішення щодо віднесення об’єкта до певного класу за нечіткими ознаками в навчальному наборі.

Розглянемо приклад класифікації КА з використанням системи нечіткого виведення. Класифікувати ці об’єкти можливо за інформацією, що передуює їх запуску, та тією, що є доступною для аналізу після їх запуску. Отже, можна виділити апіорні (до запуску, наприклад, план запуску КА) (табл. 1) та апостеріорні (після запуску) ознаки класифікації, що, у свою чергу, можуть бути прямими та непрямыми [14–16].

*Таблиця 1*

Інформація з плану запуску КА

Категорія інформації	Тип апіорної ознаки
Заявлене призначення КА	Пряма, категорійна
Полігон (космодром) запуску	Непряма, лінгвістична
Тип ракети-носія, якою буде здійснено виведення КА	Непряма, лінгвістична
Назва КА	Пряма, лінгвістична
Замовник КА	Непряма, лінгвістична
Розробник КА	Непряма, лінгвістична
Конфігурація КА	Пряма, лінгвістична
Стартова маса КА	Пряма, числова
Розрахунковий (гарантійний) строк функціонування КА	Непряма, числова
Тип орбіти	Непряма, лінгвістична
Інерційна довгота висхідного вузла орбіти	Непряма, числова

Оскільки всі ознаки різні, то отримати узагальнений висновок та прийняти рішення щодо належності КА до певного класу з визначеним ступенем істинності можна, використовуючи математичний апарат нечіткого виведення (рис. 2). Зазначений підхід дозволить вирішити завдання класифікації КА з урахуванням більшості різнорідних ознак.

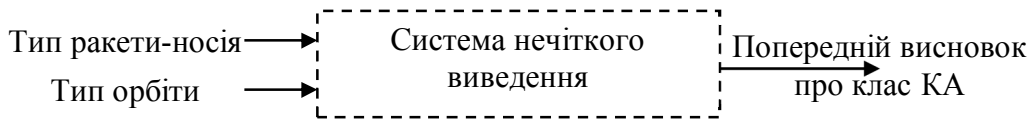


Рис. 2. Приклад моделі класифікації КА з використанням системи нечіткого виведення

Припустимо, що на 2024 рік заплановано запуск КА ViaSat 3.2 (ViaSat 3 EMEA), вага якого становить близько 6,4 т, з використанням ракети-носія Atlas-5 на орбіту висотою близько 35790 км [14–16]. Необхідно визначити типи ракети-носія й орбіти, на яку заплановано виведення КА. Ознаки “Тип ракети-носія за вантажопідйомністю” та “Тип орбіти за висотою” є непрямими лінгвістичними апріорними ознаками для подальшої класифікації КА.

Використаємо лінгвістичну змінну  $b_1$  – “Тип ракети-носія за вантажопідйомністю”, тоді множина термів цієї лінгвістичної змінної визначається як

$$T_1 = \{“Мала”, “Середня”, “Важка”, “Надважка”\} \tag{4}$$

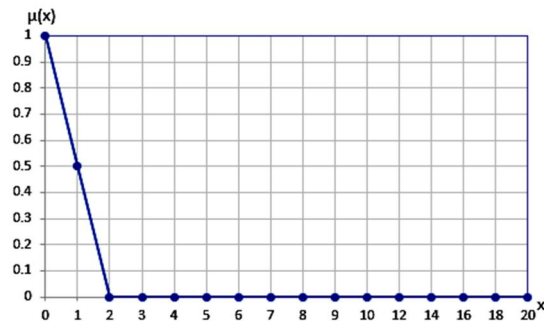
на універсумі всіх діапазонів значень змінної  $b_1$ :  $E_1 = [0, > 50]$ .

Використаємо лінгвістичну змінну  $b_2$  – “Тип орбіти за висотою”, тоді множина термів цієї лінгвістичної змінної визначається як

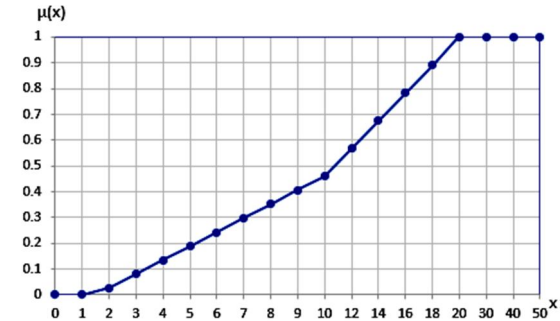
$$T_2 = \{“Низька”, “Середня”, “Висока”\} \tag{5}$$

на універсумі всіх діапазонів значень змінної  $b_2$ :  $E_2 = [160, > 35786]$ .

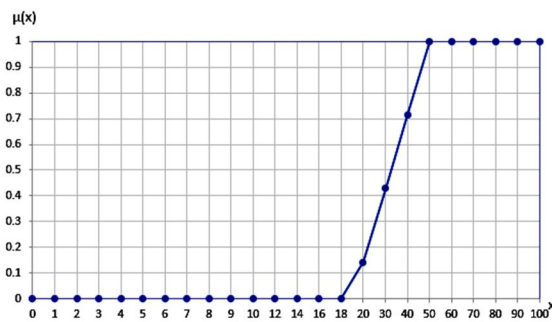
У результаті фазифікації чотирьох нечітких висловлювань для вхідної лінгвістичної змінної  $b_1$  отримуємо набір функцій належності (рис. 3).



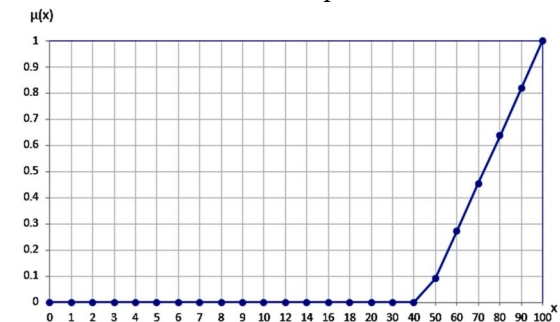
Функція належності терму “Тип ракети-носія” – мала



Функція належності терму “Тип ракети-носія” – середня



Функція належності терму “Тип ракети-носія” – важка



Функція належності терму “Тип ракети-носія” – надважка

Рис. 3. Набір функцій належності для вхідної лінгвістичної змінної  $b_1$  – “Тип ракети-носія за вантажопідйомністю”

У результаті фазифікації чотирьох нечітких висловлювань для вхідної лінгвістичної змінної  $b_2$  – “Тип орбіти за висотою” отримуємо набір функцій належності (рис. 4).

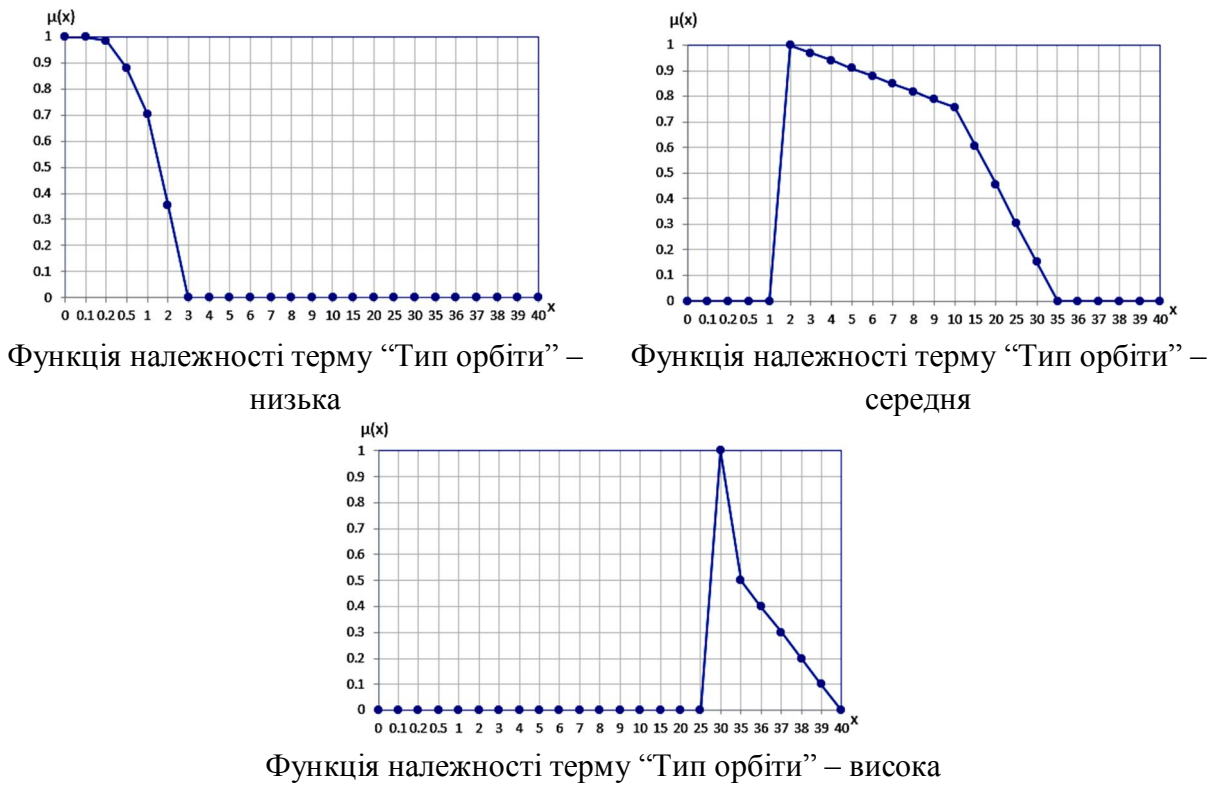


Рис. 4. Набір функцій належності для вхідної лінгвістичної змінної  $b_2$  – “Тип орбіти за висотою”

Для розглянутого прикладу, за відомих значень змінних “Вага корисного навантаження” = 6,4 т та “Висота орбіти” = 35790 км, можна зробити попередній висновок про тип ракети-носія – середня, що може бути використаний під час запуску КА, та ймовірний тип орбіти – висока, на яку буде виведено КА.

Для розроблення макета системи нечіткої логічної класифікації КА в межах набору обраних ознак були сформовані нечіткі лінгвістичні правила відповідно до виразу (3) (рис. 5).

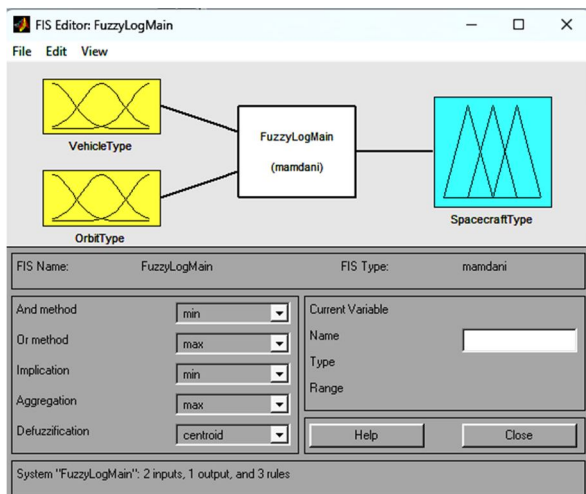


Рис. 5. Макет системи нечіткої логічної класифікації КА

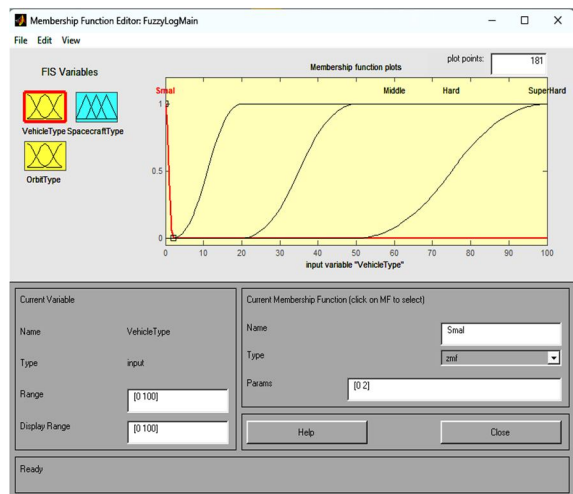


Рис. 6. Встановлення вхідних та вихідних змінних у редакторі функцій належності

Проектування макета системи нечіткої логічної класифікації КА здійснювалося з використанням інструменту Fuzzy Logic Toolbox програмного пакету Matlab. У процесі застосовувалася FIS модель Мамдані. Вхідні та вихідні змінні були задані за допомогою редактора функцій належності Membership Function Editor (рис. 6), а формування та модифікація нечітких правил проводилися в редакторі бази знань Rule Editor (рис. 7). Розроблений макет дозволяє проводити моделювання умов для класифікації КА за обраними ознаками (рис. 8), редагувати кількість вхідних та вихідних параметрів, а також формувати нові та модифікувати вже відомі нечіткі лінгвістичні правила.

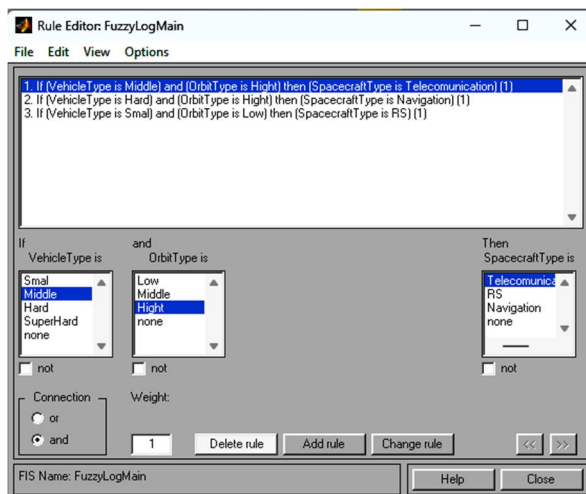


Рис. 7. Формування нечітких правил в редакторі бази знань

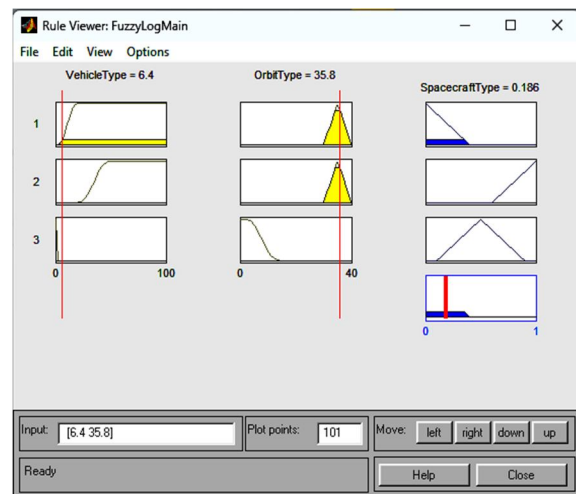


Рис. 8. Моделювання умов для класифікації КА за обраними ознаками

**Висновки.** Отже, запропонований підхід для вирішення завдання класифікації КА із застосуванням системи нечіткого логічного виведення можливо використати для комплексної їх класифікації з урахуванням максимальної кількості різномірних ознак.

Розроблений макет системи нечіткої логічної класифікації КА дозволяє наочно відобразити процес нечіткого логічного виведення та може бути базисом для спеціального програмного забезпечення такої класифікації КА з подальшим упровадженням його в процес аналізу космічної обстановки.

Подальші дослідження зазначеного напрямку передбачають:

визначення переліку ознак для класифікації КА;

наповнення бази нечітких лінгвістичних правил;

розроблення комплексного алгоритму та методики класифікації КА із застосуванням системи нечіткого логічного виведення.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Випорханюк Д. М., Ковбасюк С. В. Основи космічної ситуаційної обізнаності (Space Situational Awareness, SSA). Іноземний і вітчизняний досвід космічної діяльності у сфері оборони : Монографія. Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2018. 532 с.
2. Azami H., Mosavi M-R., Sanei S. Classification of GPS Satellites Using Improved Back Propagation Training Algorithms // Wireless Pers Commun. 2013. Vol. 71. P. 789–803.

<https://doi.org/10.1007/s11277-012-0844-7>

3. Rui C., Botelho A. S., Ademir L., Xavier Jr. A Unified Satellite Taxonomy Proposal Based on Mass and Size // *Advances in Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 4, No. 4.

<https://doi.org/10.4236/aast.2019.44005>

4. Huo Yurong, Li Zhi, Yuqiang Fang, Feng Zhang. Classification for geosynchronous satellites with deep learning and multiple kernel learning // *Applied Optics*. 2019. No. 58. P. 5830–5838.

<https://doi.org/10.1364/AO.58.005830>

5. Омельчук В. В., Пекарєв Д. В., Омельчук О. В. Узагальнення класифікації космічних апаратів дистанційного зондування Землі // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2006. № I (36). С. 75–80. URL: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/viewFile/100106/95724> (дата звернення: 23.11.2023).

6. Аналіз особливостей космічних систем гіперспектрального знімання / І. А. Беспалко, В. С. Герасимов, Д. В. Пекарєв та ін. // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2012. № 1 (60). С. 85–92. URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3285/14.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата звернення: 23.11.2023).

7. Беспалко І. А., Пекарєв Д. В., Савчук А. В. Врахування можливостей космічних орбітальних засобів видового спостереження при інформаційному забезпеченні вирішення прикладних завдань // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2013. № 1. С. 16–23. URL: [https://library.ztu.edu.ua/e-copies/VISNUK/64\\_I/16.pdf](https://library.ztu.edu.ua/e-copies/VISNUK/64_I/16.pdf) (дата звернення: 23.11.2023).

8. Фриз П. В. Спосіб вибору доступних космічних апаратів за умовами геометричної видимості між ними та заданим районом Землі // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2019. № 16. С. 94–107. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.16.09>

9. Фриз П. В. Програмно-моделюючий комплекс для інформаційної підтримки прийняття рішень в задачах космічних спостережень Землі // *Проблеми інформатизації: Матеріали дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції*. Київ, 2017. С. 126.

10. Фриз П. В., Кондратов О. М. Алгоритм автоматизованого вибору релевантних космічних апаратів для оптико-електронного спостереження заданих районів Землі // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2012. № 2 (61). С. 138–146. URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3046/21.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата звернення: 23.11.2023).

11. Хорозов О. А. Застосування нечіткої логіки для телемедицини систем // *Кібернетика і обчислювальна техніка*. Київ : Академперіодика НАН України, 2017. № 2. С. 36–48. <https://doi.org/10.15407/kvt188.02.036>

12. Писарчук О. О. Моделювання ситуаційного менеджменту та ідентифікація процесів у енергетичних інформаційних системах управління // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2014. № 4 (71). С. 98–105. URL: <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2197/17.pdf?sequence=2> (дата звернення: 28.11.2023).

13. Желдак Т. А., Коряшкіна Л. С., Ус С. А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень / За ред. С. А. Ус. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 387 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/156356> (дата звернення: 28.11.2023).

14. Orbital Launches of 2023. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_chr/lau2023.htm#planned](https://space.skyrocket.de/doc_chr/lau2023.htm#planned) (last accessed: 28.11.2023).

15. Launch Vehicles. URL: <https://space.skyrocket.de/directories/launcher.htm> (last accessed: 28.11.2023).

16. Types of orbits. URL: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits) (last accessed: 28.11.2023).

Стаття надійшла до редакції 20.12.2023.

## REFERENCES

1. Vyporkhaniuk, D. M., & Kovbasiuk, S. V. (2018). *Osnovy kosmichnoi sytuatsiinoi obiznanosti (Space Situational Awareness, SSA). Inozemnyi i vitchyznianyi dosvid kosmichnoi diialnosti u sferi oborony : Monohrafiia [Basics of Space Situational Awareness (Space Situational Awareness, SSA). Foreign and Domestic Experience of Space Activity in the Field of Defense]. Zhytomyr [in Ukrainian].*
2. Azami, H., Mosavi, M-R., Sanei, S. (2013). Classification of GPS Satellites Using Improved Back Propagation Training Algorithms. *Wireless Pers Commun., Vol. 71*, 789–803. <https://doi.org/10.1007/s11277-012-0844-7>
3. Rui, C., Botelho, A. S., Ademir, L., & Xavier, Jr. (2019). A Unified Satellite Taxonomy Proposal Based on Mass and Size. *Advances in Aerospace Science and Technology, Vol. 4*, No. 4. <https://doi.org/10.4236/aast.2019.44005>
4. Huo Yurong, Li Zhi, Yuqiang Fang, Feng Zhang. (2019). Classification for Geosynchronous Satellites with Deep Learning and Multiple Kernel Learning. *Applied Optics, No. 58*, 5830–5838. <https://doi.org/10.1364/AO.58.005830>
5. Omelchuk, V. V., Pekariev, D. V., & Omelchuk, O. V. (2006). Uzahalennia klasyfikatsii kosmichnykh aparativ dystantsiinoho zonduvannia Zemli [Generalization of the Classification of Spacecraft for Remote Sensing of the Earth]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin of ZhSTU. Technical Sciences], № 1 (36)*, 75–80 Retrieved from <http://vtn.ztu.edu.ua/article/viewFile/100106/95724> [in Ukrainian].
6. Bepalko, I. A., Herasymov, V. S., Pekariev, D. V. et al. (2012). Analiz osoblyvostei kosmichnykh system hiperspektralnoho znimannia [Analysis of the Features of Space Systems of Hyperspectral Imaging]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin of ZhSTU. Technical Sciences], № 1 (60)*, 85–92. Retrieved from <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3285/14.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [in Ukrainian].
7. Bepalko, I. A., Pekariev, D. V., Savchuk, A. V. (2013). Vrakhuvannia mozhlyvostei kosmichnykh orbitalnykh zasobiv vydovoho sposterezhennia pry informatsiinomu zabezpechenni vyrishennia prykladnykh zavdan [Taking into Account the Possibilities of Space Orbital Means of Species Observation in the Information Provision of Solving Applied Problems]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin of ZhSTU. Technical Sciences], № 1*, 16–23. Retrieved from [https://library.ztu.edu.ua/e-copies/VISNUK/64\\_I/16.pdf](https://library.ztu.edu.ua/e-copies/VISNUK/64_I/16.pdf) [in Ukrainian].
8. Fryz, P. V. (2019). Sposib vyboru dostupnykh kosmichnykh aparativ za umovamy heometrychnoi vydymosti mizh nymy ta zadanym raionom Zemli [The Method of Selecting the Available Space Vehicles Under the Terms of Geometrical Visibility Between Them and the Earth's Designated Areas]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii*



*skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute], 16, 94–107. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.16.09> [in Ukrainian].*

9. Fryz, P. V. (2017). Prohramno-modeliuiuchy kompleks dlia informatsiinoi pidtrymky pryiniattia rishen v zadachakh kosmichnykh sposterezhen Zemli [Software-Modeling Complex for Informational Decision-Making Support in Tasks of Space Observations of the Earth]. In *Problemy informatyzatsii: Materialy dev'iatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii [Problems of informatization: Proceedings of the ninth international scientific and technical conference]*. Kyiv. (pp. 126–127) [in Ukrainian].

10. Fryz, P. V., Kondratov, O. M. (2012). Alhorytm avtomatyzovanoho vyboru relevantnykh kosmich-nykh aparativ dlia optyko-elektronnoho sposterezhennia zadanykh raioniv Zemli [Algorithm of the Automated Selection of Relevant Space Vehicles for Optical-Electronic Observation of Given Regions of the Earth]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin of ZhSTU. Technical Sciences], № 2 (61), 138–146. Retrieved from <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3046/21.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [in Ukrainian].*

11. Khorozov, O. A. (2017). Zastosuvannia nechitkoi lohiky dlia telemedychnykh system [Application of Fuzzy Logic for Telemedicine Systems]. *Kibernetyka i obchysliuvalna tekhnika [Cybernetics and Computer Technology], № 2, 36–48. <https://doi.org/10.15407/kvt188.02.036> [in Ukrainian].*

12. Pysarchuk, O. O. (2014). Modeliuvannia sytuatsiinoho menedzhmentu ta identyfikatsiia protsesiv u enerhetychnykh informatsiinykh systemakh upravlinnia [Modeling of Situational Management and Identification of Processes in Energy Management Information Systems]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Bulletin of ZhSTU. Technical Sciences], № 4 (71), 98–105. Retrieved from <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2197/17.pdf?sequence=2> [in Ukrainian].*

13. Zheldak, T. A., Koriashkina, L. S., & Us, S. A. (2020). Nechitki mnozhyny v systemakh upravlinnia ta pryiniattia rishen [Fuzzy Sets in Management and Decision-Making Systems]. Dnipro. Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/156356> [in Ukrainian].

14. Orbital Launches of 2023. (2023). Retrieved from [https://space.skyrocket.de/doc\\_chrlau2023.htm#planned](https://space.skyrocket.de/doc_chrlau2023.htm#planned)

15. Launch Vehicles. (n.d.). Retrieved from <https://space.skyrocket.de/directories/launcher.htm>

16. Types of orbits. (n.d.). Retrieved from [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits)

**I. A. Bepalko, L. M. Naumchak, D. V. Pekariev**

## **MODEL DESIGN OF FUZZY LOGICAL SYSTEM OF THE SPACECRAFT CLASSIFICATION IN THE PROCESS OF SPACE SITUATION ANALYSIS**

*One of the stages of the space situation analysis is the classification of spacecraft. Existing approaches to solving this problem do not fully take into account the peculiarities of spacecraft features and classify them partially, only by individual features. Therefore, in order to implement*

*an integrated approach to solving this problem, the possibility of using the fuzzy logic apparatus is considered and the main stages of the task are determined using the theory of fuzzy sets.*

*At the initial stages, features that allow spacecraft to be classified are identified. They are obtained from the analysis of a priori and a posteriori information in numerical, categorical or linguistic form. Subsequently, linguistic variables are defined, their terms for those features that can be provided in linguistic form are defined, and their membership functions of fuzzy sets are constructed.*

*The next steps is to form a base of fuzzy production rules for a fuzzy logic system for classifying spacecraft in the process of the space situation analysis, which is the basis for developing an algorithm and software for its implementation.*

*Further steps in solving the problem of spacecraft classification based on fuzzy logic are outlined. They consist of: finding the degrees of truth of the simplest statements for given values of input parameters; calculating the truth of the preconditions of the rules; determining the membership functions of each conclusion for a common linguistic variable; combining the membership functions by constructing their maximum; obtaining a specific value of the output variable.*

*The proposed approach can be used to solve the problem of complex spacecraft classification, taking into account most of the heterogeneous features.*

**Keywords:** *spacecraft classification; classification features; linguistic variables; membership function; fuzzy production rule.*

**Андрєєв Олександр Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Державного університету «Житомирська політехніка». ORCID: 0000-0002-2601-1491

Наукові інтереси:

- космічні та геоінформаційні системи;
- моделювання та обробка інформації в складних технічних системах.

**Беспалко Ірина Анатоліївна** – кандидат технічних наук, науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-7197-7324

Наукові інтереси:

- космічні та геоінформаційні системи;
- методики класифікації об'єктів.

**Бугайов Микола Вікторович** – кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник начальника науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-0899-9843

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

**Войтко Тетяна Миколаївна** – науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Національного університету оборони України імені Івана Черняховського. ORCID: 0000-0002-4326-0633

Наукові інтереси:

- стратегічні комунікації;
- інформаційне протиборство;
- інформаційні системи.

**Гладич Роман Іванович** – науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0005-4500-4237

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- архітектура спеціального програмного забезпечення.

**Гончаров Денис Олександрович** – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняховського. ORCID: 0009-0006-0690-0079

Наукові інтереси:

- удосконалення систем радіоелектронної розвідки;
- інформаційна доступність джерел радіомоніторингу.

**Денисюк Анатолій Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Поліського національного університету. ORCID: 0000-0003-4226-2394

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних систем;
- обробка радіолокаційної інформації на фоні перешкод;
- підвищення точності виміру координат на фоні перешкод.

**Дубина Олександр Федорович** – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-3448-6072

Наукові інтереси:

- цифрова обробка сигналів;
- космічні та геоінформаційні системи.

**Закіров Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник відділу Науково-дослідного інституту воєнної розвідки. ORCID: 0000-0002-1241-6180

Наукові інтереси:

- розробка основних принципів, напрямків та перспектив застосування засобів радіоелектронної боротьби.

**Залевський Віктор Йосипович** – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-1861-6084

Наукові інтереси:

- дослідження у сфері радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби;
- дослідження у сфері застосування безпілотних літальних апаратів.

**Клязника Володимир Вікторович** – заступник начальника кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-3557-2052

Наукові інтереси:

- комплекси та засоби радіоелектронної розвідки.

**Ковальчук Валентина Вікторівна** – технік кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-1384-7617

Наукові інтереси:

- теоретичні дослідження електромагнітного поля;
- дослідження у сфері радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби.

**Лобода Вероніка Вікторівна** – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-3535-0233

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- стратегічні комунікації.

**Мірошніченко Сергій Іванович** – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0007-2076-041X

Наукові інтереси:

- автоматизовані системи управління;
- інформаційні системи.

**Міхєєв Юрій Іванович** – кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-6239-2324

Наукові інтереси:

- інформаційні технології;
- архітектура спеціального програмного забезпечення.

**Нагорнюк Олександр Анатолійович** – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-7680-7201

Наукові інтереси:

- методи цифрової обробки та розпізнавання радіосигналів;
- методи радіопеленгації;
- методи проектування та дослідження антен.

**Наумчак Леонід Михайлович** – науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0002-7311-6659

Наукові інтереси:

- космічні та геоінформаційні системи;
- математичні методи й алгоритми оброблення видової інформації.

**Наумчак Олена Михайлівна** – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0003-3336-1032

Наукові інтереси:

- оброблення даних дистанційного зондування Землі.

**Пекарєв Дмитро Володимирович** – заступник начальника Секції прикладних проблем Президії Національної академії наук України. ORCID: 0000-0002-5056-4993

Наукові інтереси:

- проектування складних інформаційних систем;
- моделювання систем аналізу космічної обстановки.

**Пількевич Ігор Анатолійович** – заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-5064-3272

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних систем та процесів;
- боротьба в електромагнітному середовищі;
- кіберзахист.

**Поздняков Володимир Васильович** – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0009-0004-6382-0935

Наукові інтереси:

- акустичні сигнали, методи їх виявлення та оброблення.

**Пулеко Ігор Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. ORCID: 0000-0001-8875-017X

Наукові інтереси:

- моделювання та обробка інформації в складних технічних системах;
- інформаційні технології в управлінні групами розподілених динамічних об'єктів;
- штучний інтелект у технічних системах; Інтернет речей.

**Сидорчук Ольга Леонідівна** – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.  
ORCID: 0000-0002-8767-9129

Наукові інтереси:

- радіоелектронний захист складних антенних систем;
- теоретичні дослідження електромагнітного поля;
- дослідження у сфері радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби.

**Соболенко Сергій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.  
ORCID: 0009-0006-1662-2244

Наукові інтереси:

- телекомунікаційні системи та мережі;
- математичне моделювання складних технічних систем.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Стаття подається в одному примірнику друкованого тексту на білому папері формату А4 у редакторі Microsoft Word шрифтом Times New Roman, розмір літер – 12 пт, стиль – normal (звичайний), міжрядковий інтервал – 1.2, абзац з відступом 0,8 см, інтервал перед та після абзацу – 0 пт, параметри сторінки: зліва – 2,25 см, справа – 2,25 см, зверху – 2,12 см, знизу – 2,0 см, від краю до верхнього колонтитула – 1,25 см, та нижнього – 1,75 см; сторінки без нумерації. Обсяг статті від 5 до 10 сторінок (без анотацій).

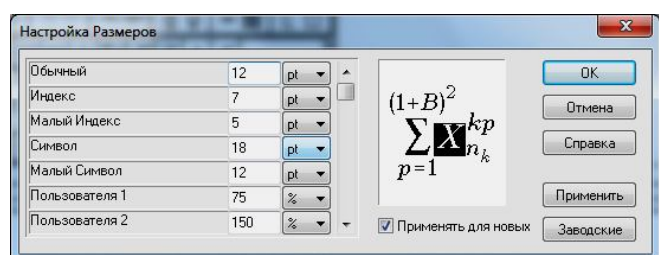
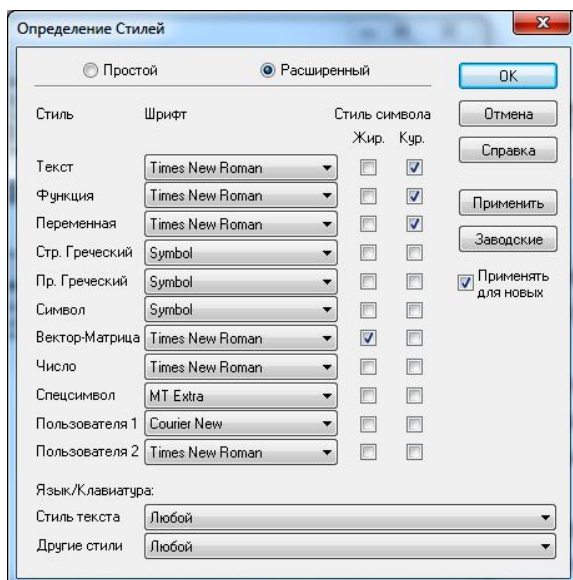
Наукова праця має бути якісно відредагована та **підписана авторами** на звороті останнього аркуша із зазначенням: «У статті інформація з обмеженим доступом відсутня».

До статті додаються: **довідка** про результати перевірки тексту на плагіат, **витяг з протоколу** засідання вченої (наукової, науково-технічної) ради установи (підрозділу) з обґрунтуванням доцільності опублікування роботи; **рецензія** за підписом провідного вченого в даному напрямі наукових досліджень – доктора наук; **дані про авторів** із зазначенням прізвища, імені та по батькові (повністю), наукового ступеня, вченого звання, посади або професії, ORCID, наукових інтересів (обов'язково), контактного телефону, e-mail.

Разом зі статтю подається її електронний варіант з розширенням doc (e-mail, на CD-R, DVD-R) із файлами, які містять: текст статті українською мовою; прізвища, назву, анотацію (із ключовими словами) українською та англійською мовами, REFERENCES, а також дані про авторів.

## ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ РУКОПISУ

1. Індекс УДК зазначається в лівому верхньому куті перед відомостями про авторів.
2. Ініціали та прізвища авторів – у правому куті (без наукового ступеня та вченого звання, шрифт напівжирний, без нахилу і підкреслювань).
3. Назва статті друкується великими літерами (шрифт напівжирний, без нахилу і підкреслювань) по центрі аркуша без переносів і відокремлюється від тексту одним вільним рядком зверху та знизу.
4. Анотація українською мовою з ключовими словами друкується курсивом під назвою статті й відокремлюється від заголовка та тексту одним вільним рядком. Її обсяг разом із ключовими словами має становити не менше 1800 друкованих знаків (разом із пробілами).
5. Формули в статтях повинні бути надруковані за допомогою редактора формул *Equation Editor*. Усі параметри мають повністю відповідати наведеним нижче формам.



Усі формули розміщують у таблиці без обрамлення, по центрі, без абзацу. Номер формули зазначається посередині висоти другої колонки з виключкою вправо. Усі буквені позначення у формулах та рисунках, а також у тексті статті повинні бути однаковими за розміром і гарнітурою. Допускаються виділення напівжирним шрифтом, курсивом та підкреслювання за бажанням автора.

6. Рисунки до статті потрібно виконувати в редакторі Microsoft Word за допомогою функції «Створити малюнок». Не допускаються рисунки, оформлені як растрові зображення, або такі, що не піддаються редагуванню. Усі текстові написи на рисунках слід робити тільки в кадрах або текстових рамках. Розміри рисунка не повинні виходити за межі полів.

7. Стандартні таблиці слід виконувати в редакторі Microsoft Word. Вони повинні мати короткий заголовок.

8. Відповідно до постанови президії ВАК України від 15 січня 2003 року № 7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліку ВАК України» наукові статті, що подаються до друку, повинні містити такі необхідні елементи з їх зазначенням: постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано вирішення даної проблеми та на які спирається автор, а також обов'язково виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячена стаття; постановка завдання (формулювання цілей статті); виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у даному напрямку. Список літератури (не менше 5 джерел) розміщується після статті в порядку згадування або в алфавітному порядку; посилання на літературу в тексті слід давати в квадратних дужках, наприклад, [1]. Бібліографічний опис оформлюється згідно з ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання».

9. Після списку літератури наводиться REFERENCES, оформлений у стилі APA.

10. Далі подаються англійською мовою: прізвища авторів, назва статті, анотація та ключові слова (обсягом не менше ніж 1800 знаків разом із пробілами).

Редакція не несе відповідальності за викладену в статті інформацію. Автори відповідають за точність наведених у публікації даних, цитат, статистичних матеріалів тощо. Матеріали, оформлені з відхиленням від зазначених вимог, редколегія не розглядає.

Публікація в збірнику наукових праць безкоштовна та не передбачає отримання автором (авторами) гонорару та авторського примірника. Установа, представником якої є автор (автори) статті, включається до списку організацій, яким розсилається збірник наукових праць.

Статті приймаються за адресою: Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова (науково-організаційне відділення), просп. Миру, 22, м. Житомир, 10004.

**Телефон для довідок:** (0412) 48-30-19 (дод. 48-632, 46-675).

**E-mail:** [nov.zvir@gmail.com](mailto:nov.zvir@gmail.com)



**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

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

**Збірник наукових праць**

**Випуск 25 (I)**

Видавничий оригінал виготовлений  
у науково-організаційному відділенні ЖВІ

Редактор: **Л. М. Марищук**  
Комп'ютерна верстка та макетування **Л. М. Марищук**

Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 7355 від 9 червня 2021 року.

Підписано до друку 25.12.2023. Формат 60×84 / 8.  
Ум. друк. арк. 13,95. Тираж 100 прим. Зам. 693 опер.

Безкоштовно  
Друкарня ЖВІ

10004, м. Житомир, просп. Миру, 22