

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

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

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**22**

**Житомир**  
**2022**

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 22 / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2022. – 116 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.22>

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 № 15 від 07.07.2022.

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

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

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

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

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

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

СТАВІСЮК Р. 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>Левченко А. О., Трутнев С. Г., Ісмаїлова Н. П., Шарипова І. В.</b> Програмна реалізація підсистем обміну даними експертів у розподілених комплексах імітаційного моделювання бойових дій.....	4
<b>Сидорчук О. Л.</b> Проблематика методів оцінювання антен зі зменшеною ефективною поверхнею розсіювання засобів радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби.....	14
<b>Бойченко О. С., Костерев Д. С., Маковський І. Ю., Грищук О. М.</b> Математична модель розрахунку цінності інформації установи.....	30
<b>Костиря О. О., Гризо А. А., Додух О. М., Невмержицький І. М., Нагорнюк О. А., Міняйло В. М.</b> Результати експериментальних досліджень багатодіапазонного імітатора постановника активних шумових перешкод.....	41
<b>Таршин В. А., Залевський Г. С., Очкуренко О. В., Стовба Р. Л.</b> Особливості виявлення оперативно-тактичних безпілотних літальних апаратів радіолокаторами радіотехнічних військ.....	55
<b>Дубина О. Ф., Андрєєв О. В., Нікітчук Т. М., Пулеко І. В., Гаценко С. С., Клязника В. В.</b> Синтезування апертури антени за сигналами наземних радіолокаційних станцій з космічного носія.....	69
<b>Ярмолюк В. М., Бачинський В. В., Люлька О. В., Горошко О. О., Марченко О. В.</b> Концепція модульних тренажерних систем з можливістю швидкої зміни функціонального призначення.....	79
<b>Бачинський В. В., Шкурпіт О. М.</b> Підбір матеріалу для виготовлення елементів безпілотних літальних апаратів за адитивними технологіями.....	90
<b>Дем'янчук Б. О., Сухін О. В., Косенко А. В., Угольніков О. П.</b> Прогнозні оцінки системи забезпечення живучості зразків озброєння.....	99
<b>Автори випуску</b> .....	112

А. О. Левченко, С. Г. Трутнєв, Н. П. Ісмаїлова, І. В. Шарипова

## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДСИСТЕМ ОБМІНУ ДАНИМИ ЕКСПЕРТІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ КОМПЛЕКСАХ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

*Інтенсивний розвиток інформаційних систем створює умови для розробки і 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, що до них висуваються.*

*Одним із напрямків реалізації інформаційних систем у сучасних зразках бойової техніки є блоки управління інформаційних систем, які забезпечують не тільки управління зразком бойової техніки, але й оперативний обмін даними з екіпажем. Сучасні комплекси імітаційного моделювання бойових дій (типу PEO STRI американської компанії Alion Science & Technology) дозволяють проводити імітацію бою підрозділу з обміном даними між екіпажем (експертами).*

*Основну роль у забезпеченні безпеки в підсистемах обліку сучасних комплексів моделювання бойових дій повинні відігравати напрацьовані й перевірені методи сучасної криптографії. Використання того чи іншого криптографічного протоколу або алгоритму має бути продиктовано необхідністю та обґрунтованістю.*

*Оскільки безпечний обмін даними є критичним питанням у сучасних умовах розвитку Збройних Сил України в цілому та в підсистемах обліку сучасних комплексів моделювання бойових дій зокрема, а під час обміну даними повинні вживатися такі заходи, за яких передача даних з кожного робочого місця системи недоступна третім стороннім особам, запропоновано використання технології блокчейн у сфері електронного обміну даними. У такому процесі підвищується ймовірність недопущення витoku даних. Однак під час захищеного обміну даними неможливо визнати цю процедуру повністю адекватною, тому що такий спосіб інформаційного обміну не можна верифікувати, якщо буде велика кількість операторів (тобто на оперативно-тактичному рівні).*

**Ключові слова:** обмін даними; захист даних робочого місця; моделювання; блокчейн; інформаційні системи; бойові дії.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Обмін даними між інформаційно-керувальними системами є основною проблемою особливо на тактичному рівні. З розвитком комп'ютерних технологій та автоматизованих систем необхідність удосконалення автоматизації процесів обміну даними на сьогоднішній день є найбільш актуальною. Не менш важливим також є обмін даними, які містять у собі закриту інформацію від третіх осіб.

Наявні системи обміну даними застарілі та не в повному обсязі забезпечують автоматизовану передачу інформації в комп'ютерних системах, крім того, вони складні  
© А. О. Левченко, С. Г. Трутнєв, Н. П. Ісмаїлова, І. В. Шарипова, 2022

у використанні. Одним із таких процесів, які необхідно автоматизувати, є робота на комплексах імітаційного моделювання бойових дій, наприклад, відпрацювання тактичних заходів з різними силами на різноманітних ділянках місцевості, порядок організації взаємодії зі своїми підрозділами, а також із підпорядкованими, що мають розподілену структуру, зокрема в навчальних закладах під час проведення занять. Крім того, великий інтерес викликає можливість автоматизувати обмін даними на різних рівнях. Саме тому більшість розробок на даний момент здійснюється в цьому напрямку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [4, 16] досліджено питання розвитку технології розподіленого реєстру (блокчейну) і можливостей його застосування в різних сферах людської діяльності. У згаданих роботах додатково проаналізовано принципи, згідно з якими працює технологія блокчейн. Визначено її найсильніші сторони захисту від хакерських атак або змін складових ланцюгів та блоків.

Автор роботи [11], який є засновником Інституту блокчейн-досліджень (Institute for Blockchain Studies), більш детально розглянув можливості використання та провадження технології блокчейн у різних сферах діяльності. Логічним продовженням його дослідження є [12, 15], де проаналізовано захищені системи електронного голосування на основі криптографічних алгоритмів.

Варто зазначити, що багато популярних інтернет-джерел та таблойдів звертають увагу на велику перспективу розвитку цієї технології, зокрема й у військовій сфері. Деякі з них зазначають, що технологія блокчейн має великі перспективи в захисті інформаційних систем (ІС) із закритим доступом.

**Формулювання завдання дослідження.** Основною метою роботи з визначення доцільних шляхів створення підсистем обміну даними є підвищення безпеки криптографічного захисту даних в інформаційно-керувальних системах та комплексах імітаційного моделювання шляхом модифікації протоколу передачі даних із використанням технології блокчейн. Головною роллю у забезпеченні безпеки в проєктованій підсистемі обміну даними програмної реалізації підсистем обміну даними експертів у розподілених комплексах імітаційного моделювання бойових дій повинні відігравати напрацьовані та перевірені методи сучасної криптографії, використання того чи іншого криптографічного протоколу або алгоритму. Отже, логічним є продовжити вивчення використання технології блокчейн для підвищення криптографічного захисту в розподілених системах.

Завданням роботи є вивчення можливостей створення програмної реалізації підсистем обміну даними в розподілених системах імітаційного моделювання бойових дій. Розробка відповідного програмного забезпечення надасть можливість у подальшому проводити порівняльний аналіз технології криптографічного захисту в реальних умовах.

**Виклад основного матеріалу.** Створення систем обміну даними із застосуванням технології блокчейн тільки починає впроваджуватися у військову сферу, тоді як, наприклад, переваги проведення виборів через мережу загального користування є очевидними. Серед них можна виділити корисні і для підсистем обміну даними в системах моделювання бази даних (БД):

можливість дистанційної роботи;

конфіденційність оператора;  
можливість перегляду переданих даних;  
економія часу;  
відповідність рекомендаціям кодексу корпоративного управління;  
здійснення підрахунку голосів (обмін даними) за менший проміжок часу;  
простота використання сервісу.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

- 1) вивчення протоколів електронного обміну даними;
- 2) огляд систем електронного обміну даними та сфери застосування;
- 3) дослідження криптографічних методів, що використовуються в комплексах імітаційного моделювання;
- 4) модифікація протоколу обміну даними з використанням технології блокчейн.

Безпосередньо обмін даними може бути відкритим чи закритим. Відкритий забезпечує обмін даними, що не містять інформації з обмеженим доступом. Закритий обмін даними призначений для обмеженого кола посадових осіб [13], що не обов'язково передбачає обмін між елементами розподіленої системи даних, які містять інформацію з обмеженим доступом.

Отже, під час закритого обміну даними вживаються заходи, щоб інформація, передана оператором, була недоступною третім особам. У такому разі підвищується ймовірність уникнення витоку даних для сторонніх. Електронний обмін даними – термін, який використовують для різних типів передачі інформації, охоплюючи ним як процес здійснення обміну даними за допомогою електронних засобів, так і процес автоматичної передачі інформації за допомогою електронних пристроїв та спеціального програмного забезпечення. Якщо система забезпечення кібергігієни в державних органах дозволяє вирішити питання безпосереднього переносу даних, то ймовірність їх втрати або підміни під час передачі телекомунікаційним обладнанням залишається високою. Системи електронного обміну даними можна поділити на два типи: ті, які потребують безпосереднього втручання оператора, й ті, що дозволяють обмін даними дистанційно.

Сучасна система обміну даними для програмної реалізації підсистем обміну даними експертів у розподілених комплексах імітаційного моделювання бойових дій має відповідати таким вимогам:

- 1) авторизованість (тільки авторизовані користувачі можуть здійснювати обмін даними);
- 2) унікальність (кожен користувач має право доступу до визначеного адміністратором об'єму даних);
- 3) точність (система передавання даних без коригування, тобто інші користувачі не можуть вносити зміни до них);
- 4) верифікованість (можливість перевірити, чи точні дані передані користувачем);
- 5) таємність (забезпечення прихованості інформації; ніхто не може визначити, звідки та кому вона була передана);
- б) автоматизованість (користувач, передаючи дані, не повинен визначати адресатів, а система самостійно здійснює передачу даних необхідним абонентам).

**Опис рішень для програмної реалізації системи обміну даними.** Під час досліджень спроектовано та розроблено варіанти реалізації сервісу для обміну даними на

основі технології блокчейн з використанням розподіленої та традиційної БД, які дозволяють домогтися максимальної продуктивності, зберігаючи при цьому всі переваги використання цієї технології.

Для розробки програмної реалізації використовувалася мова JavaScript для створення користувацького інтерфейсу та сервера. За БД обрано MongoDB, яка зберігає дані у форматі JSON, що дозволяє застосовувати універсальний формат серіалізації даних, які використовуються для клієнта та на сервері. Це сприяє легкості читання, зрозумілості та цілісності додатка.

Для створення моделей даних, які мають зберігатися в централізованій документоорієнтованій MondoDB, використовують бібліотеку Mongoose [3], що надає можливість створювати чітку схему для роботи з БД. Прикладом створення схеми даних може правити модель User – користувач системи:

```
const userSchema = mongoose.Schema({
  _id: mongoose.Schema.Types.ObjectId,
  email: { type: String, required: true, unique: true,
    match: /^[a-z0-9!#$%&'*/+=?^_`{|}~]+(?:\.[a-z0-9!#$%&'*/+=?^_`{|}~-]+)*@(?:[a-z0-9](?:[a-z0-9]*[a-z0-9])?\.)+[a-z0-9](?:[a-z0-9]*[a-z0-9])?/
  },
  socialNumber: { type: String, required: true, unique: true, match: /[0-9]{10}/},
  password: { type: String, required: true },
  isAdmin: Boolean
});
module.exports = mongoose.model('User', userSchema).
```

Також ця бібліотека дозволяє описати тип валідації моделі даних.

Для входу в систему був створений клас UserController, що є контролером, який дозволяє зареєструватися та виконати автентифікацію в системі. Для реєстрації користувачеві необхідно ввести свою електронну пошту, ідентифікаційний номер, а також пароль, що мають бути унікальними. Після успішної авторизації користувач може розпочинати роботу з виділеними йому обов'язками в системі.

Клас Candidate Controller призначений для обліку користувачів у системі. Лише її адміністратор може створювати чи видаляти дані користувачів. Переглядати інформацію, надану користувачами, може будь-який авторизований користувач системи.

Клас Vote Controller призначений для обміну даними із заданими датою, часом початку та закінчення обробки даних.

Клієнтський додаток містить логіку роботи з блокчейн, де реалізовані класи роботи з ним.

Клас Block відображає сутність блоку в розподіленій базі блокчейн. Він містить хеш, хеш попереднього блоку, дату створення, список транзакцій, а також число, яке було знайдено під час майнінгу. У даному класі реалізовані методи пошуку хеш-образу даного блоку, майнінг блоку, а також перевірка валідності транзакцій.

Клас Transaction є моделлю підтвердження користувача в розподіленій системі блокчейн. Він містить адреси відправника й одержувача, тобто адреси пристроїв та дату створення. У даному класі реалізовано методи обчислювання хеш-образу транзакції, створення та перевірки підпису.

Клас Blockchain відображає сутність розподіленої БД у запропонованому протоколі системи. Він містить ланцюг блоків, параметр складності знаходження хеш-образу для майнінгу, а також список транзакцій, що очікують майнінгу. Реалізовано метод створення первинного блоку, оскільки його розглядають як окремий випадок. Первинний блок не має блоків нащадків. Також описано методи додання транзакцій у список очікуваних, визначення достовірності користувача та перевірки валідності БД блокчейн.

Клас Node відображає сутність вузла розподіленої системи. У ньому реалізовано доступ до P2P-мережі. Кожен вузол системи зберігає в собі БД блокчейн, підключення до P2P, список підключень в одноранговій мережі. Клас має методи отримання всіх поточних підключень у мережі, відправки заявки на отримання актуальної БД блокчейн та метод розповсюдження повідомлення мережею.

Після успішної авторизації в системі користувач автоматично підключається до однорангової мережі та оповіщає всіх, відсилаючи свій ідентифікатор у P2P-мережі. Після цього, знаючи підключення один одного, кожен вузол має можливість відправляти повідомлення за протоколом WebRTC, у такий спосіб реалізовано мережу спілкування без підтримки сервера.

**Опис роботи системи електронного обміну даними.** Після вдалої реєстрації та входу в систему користувач отримує можливість згенерувати приватний ключ, який має зберегти на своєму носії.

Після авторизації в системі користувач потрапляє на головну сторінку, на якій є короткий пояснювальний курс системи обміну даними. Далі користувач може перейти на сторінку перегляду інших користувачів системи імітаційного моделювання, на якій є основна інформація про кожного експерта (рис. 1).

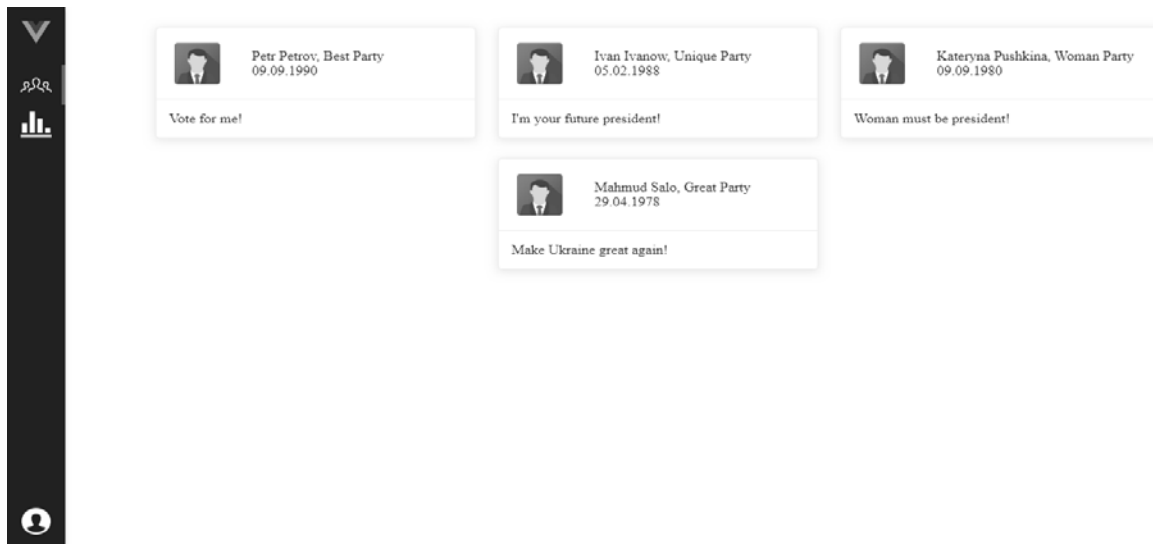


Рис. 1. Сторінка перегляду користувачів

Користувач в реальному часі може переходити на сторінку обміну даними, де створені умови, щоб передати інформацію та переглянути наявні дані на сервері в об'ємі відповідно до доступу (рис. 2).

Після того, як користувач сформував дані для передачі, з'являється вікно для введення особистого ключа.



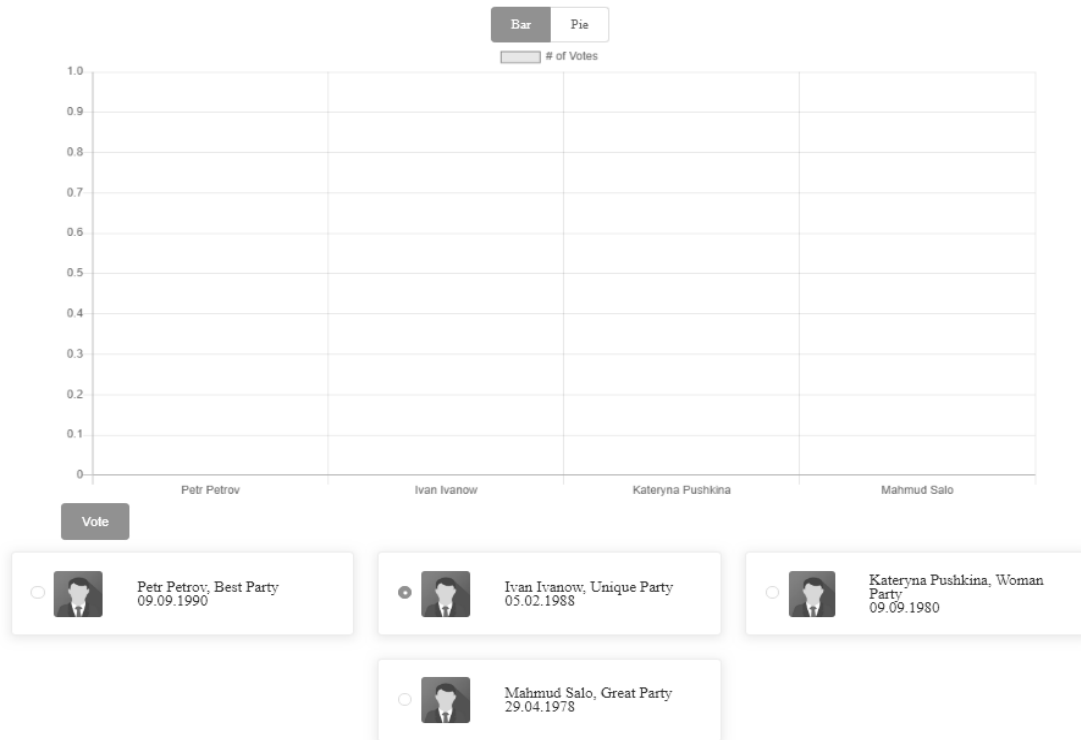


Рис. 2. Сторінка обміну даними

У той час, коли користувач підтвердив введення особистого ключа, починається процес генерації публічного ключа, після цього створюється транзакція з адресою відправника (публічного ключа), адресою отримувача. Далі генерується підпис транзакції з використанням приватного ключа. Користувач майнить блок, у який додається транзакція. Одразу, як блок було замайнено, він відсилається в мережу, де всі користувачі можуть додати його до своєї БД блокчейн. У такий спосіб було здійснено передачу даних.

Якщо користувач намагається ще раз передати ту ж саму інформацію, то він отримує повідомлення, що він вже її передав, оскільки його адреса вже присутня в БД.

Проаналізовані можливі кібератаки на SEG із застосуванням технології блокчейн, тобто на розподілену систему. Найпоширенішими є атака подвійної трати, DoS/DDoS-атаки та атака Сивілли.

Атака подвійної трати полягає в тому, що зловмиснику необхідно:

виконати транзакцію, що атакує попередню оплату;

таємно майнити, використовуючи той блок, що включає в себе останню транзакцію;

продовжувати майнити таємну альтернативну гілку блокчейну, доки вона не стане більшою, ніж публічна, після чого вона транслюється в мережу. Оскільки нова гілка довша, ніж усі відомі, вона буде дійсною і переказ транзакції отримувачу буде замінено на переказ зловмиснику.

Атака подвійної трати має ймовірність успіху, якщо зловмисник має більш, ніж 50% обчислювальної потужності. Якщо підконтрольна обчислювальна потужність становить менше ніж 50%, то ймовірність успіху експоненціально знижується. Навіть наявність більше ніж 50% ресурсів не гарантує створення альтернативної гілки [6].

DDoS-атака проводиться одночасно на велику кількість комп'ютерів з метою спричинити відмову в обслуговуванні сервера чи мережі. Для запобігання цього типу атак

служує обчислення задачі майнінгу (Proof-of-Work). Неможливо створити блок так часто, щоб організувати спам-розсилання в мережі. З підвищенням складності знаходження хеш-образу та його криптографічної стійкості витрачається більше часу, що є також ускладненням для зловмисників, яким під час спроби змінити дані в блоці буде необхідно перерахувати усю подальшу послідовність блоків, а також переконати всіх користувачів системи, що це валідна БД блокчейн, що є майже неможливим.

У табл. 1 наведено результати тестування майнінгу одного блока за підвищення складності.

*Таблиця 1*

Результати тестування майнінгу одного блоку

№	Складність (кількість «0» на початку хеш)	Середній затрачений час
1	00	0,02 с
2	000	0,2 с
3	0000	3 с
4	00000	45 с
5	000000	500 с (8,3 хв)
6	0000000	~ 2 год.

Отже, у разі великої складності обчислень стає майже неможливим перерахувати на одному комп'ютері достатньо великий ланцюг блоків, тобто неможливо змінити дані в розподіленій БД блокчейн. Якщо навіть зловмиснику вдалося перерахувати ланцюг блоків, йому необхідно змінити блокчейн на кожному вузлі розподіленої системи, що є неможливим.

Завдяки тому, що розподілена система організована за допомогою однорангової мережі, якщо сервер комплексу імітаційного моделювання БД буде виведено з ладу в результаті DDOS атаки, то система функціонуватиме далі, а дані не будуть втрачені чи пошкоджені.

Атака Сивілли – атака, під час якої зловмисник заповнює мережу підконтрольними йому вузлами і намагається оточити вузол жертви, заволодіти сусідніми вузлами мережі. Отримавши доступ до вузлів, зловмисник:

- контролює всі вхідні та вихідні дані;
- може передавати жертві некоректну інформацію;
- може блокувати передачу даних.

Реалізація даної атаки стає неможливою, оскільки підключення до будь-якого вузла відбувається випадково, неможливо заздалегідь знати сусідні підключення будь-якого вузла.

Результати проведеного аналізу технології блокчейн і можливості її використання у сфері електронного обміну даними дозволяють стверджувати, що усі вимоги, розроблені щодо виконання та роботи системи імітаційного моделювання, були виконані.

**Висновки.** Сектор імітаційного моделювання у збройних силах провідних країн світу займає визначне місце в системі підготовки військ (сил). Навчання із застосуванням засобів імітаційного моделювання батальйонного, бригадного та вищого рівня включені в загальну систему бойової підготовки. На даний час цей досвід також успішно впроваджується й у Збройних Силах України.

Розвиток спеціального програмного та математичного забезпечення імітаційного моделювання йде в напрямку найбільш повної імітації всіх функцій застосування озброєння, бойової техніки та військових формувань.

Оскільки безпечний обмін даними є критичним питанням у сучасних умовах розвитку Збройних Сил України в цілому та в підсистемах обліку сучасних комплексів моделювання БД зокрема, а під час обміну даними повинні вживатися такі заходи, у ході яких передача даних кожного робочого місця системи недоступна третім особам, запропоновано використання технології блокчейн у сфері електронного обміну даними.

Отже, програмна реалізація підсистем обміну даними експертів у розподілених комплексах імітаційного моделювання бойових дій за допомогою технології блокчейн є достатньо простим у впровадженні, захищеним, однозначним і досить потужним рішенням для застосування в сучасних комплексах імітаційного моделювання БД.

### **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Don Tapscott, Alex Tapscott. Blockchain revolution. How the technology underlying bitcoin and other cryptocurrencies is changing the world. London : Publisher Penguin, 2018. 488 p. <https://doi.org/10.1177/2319714518814603>
2. Javascript-фреймворки: тенденции 2019 года. URL: <https://habr.com/ru/company/plarium/blog/433926/> (дата обращения: 20.01.2022).
3. Mongoose. URL: <https://mongoosejs.com/> (last accessed: 20.12.2021).
4. Overview of the Blockchain Industry in Ukraine. URL: <https://www.slideshare.net/Blockchainukraine/overview-of-the-blockchain-industry-in-ukraine-145456836?fbclid=IwAR2oawBP1GeGagq4gU6e35sLWGI> (last accessed: 02.01.2022).
5. Peer-to-peer. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (last accessed: 10.01.2022).
6. SQL или NoSQL – вот в чем вопрос. URL: <https://habr.com/ru/company/ruvds/blog/324936/> (дата обращения: 10.01.2022).
7. Введение. Что такое Vue.js? URL: <https://ru.vuejs.org/v2/guide/> – 03.01.2018 (дата звернення: 10.01.2022).
8. Еліптична криптографія. URL: <https://habr.com/ru/post/191240/> (дата звернення: 14.01.2022).
9. Належне хешування паролів. URL: <https://www.securitylab.ru/analytics/427930.php> (дата звернення: 14.01.2022).
10. Пірингові мережі. URL: <http://dwl.kiev.ua/art//p2p/p2p-end.pdf> (дата звернення: 20.01.2022).
11. Свон М. Блокчейн: схема новой экономики. Москва : Изд-во «Олимп-Бизнес», 2017. 240 с.
12. Тарасов А. І., Шпінарева І. М. Система електронного голосування із застосуванням технології блокчейн // Захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах : зб. тез доповідей III Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених, студентів і курсантів «Захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах». Львів, 2019. С. 121.
13. Толковый словарь Дмитриева URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/dmitriev/807голосование> (дата обращения: 20.01.2022).
14. Хеш-функції. URL: <https://sites.google.com/site/anisimovkhv/learning/kripto/lecture/tema9> (дата звернення: 20.01.2022).
15. Яркова О. Н., Осіпова А. А. Захищена система електронного голосування на основі криптографічних алгоритмів // Вісник УРФО. Безпека в інформаційній сфері. 2014. № 2 (12). С. 9–15.

16. Яцків Н. Г., Ятсків С. В. Перспективи використання технології блокчейн у мережі Інтернет речей // Науковий вісник НЛТУ України. 2016. Вип. 26 (8). С. 381–387. <https://doi.org/10.15421/40260857>

Стаття надійшла до редакції 27.01.2022.

## REFERENCES

1. Don Tapscott, & Alex Tapscott. (2018). *Blockchain revolution. How the technology underlying bitcoin and other cryptocurrencies is changing the world*. London: Publisher Penguin. <https://doi.org/10.1177/2319714518814603>
2. *Javascript-freimvorki: tendentsii 2019 goda [Javascript frameworks: trends of 2019]*. (2019). Retrieved from <https://habr.com/ru/company/plarium/blog/433926/> [in Russian].
3. *Mongoose*. (n.d.). Retrieved from <https://mongoosejs.com/>
4. *Overview of the Blockchain Industry in Ukraine*. (n.d.). Retrieved from <https://www.slideshare.net/Blockchainukraine/overview-of-the-blockchain-industry-in-ukraine-145456836?fbclid=IwAR2oawBP1GeGagq4gU6e35sLWGI>
5. *Peer-to-peer*. (n.d.). Retrieved from <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
6. *SQL ili NoSQL – vot v chem vopros [SQL or NoSQL, that is the question]*. (n.d.). Retrieved from <https://habr.com/ru/company/ruvds/blog/324936/> [in Russian].
7. *Vvedennia. Shcho take Vue.js? [Introduction. What is Vue.js?]*. (n.d.). Retrieved from <https://ru.vuejs.org/v2/guide/-03.01.2018> [in Ukrainian].
8. *Eliptychna kryptohrafiia [Elliptical cryptography]*. (n.d.). Retrieved from <https://habr.com/ru/post/191240/> [in Ukrainian].
9. *Nalezhne khashuvannia paroliv [Proper hashing of passwords]*. (n.d.). Retrieved from <https://www.securitylab.ru/analytics/427930.php> [in Ukrainian].
10. *Pirynhovi merezhi [Peer networks]*. (n.d.). Retrieved from <http://dwl.kiev.ua/art/p2p/p2p-end.pdf> [in Ukrainian].
11. Svon, M. (2017). *Blokchein: skhema novoi ekonomiki [Blockchain: New Economy Scheme]*. Moscow [in Russian].
12. Tarasov, A. I., & Shpinareva, I. M. (2019). Systema elektronnoho holosuvannia iz zastosuvanniam tekhnolohii blokchein [Electronic voting system using blockchain technology]. In *Zakhyst informatsii v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh: zb. tez dopovidei III Vseukr. nauk.-prakt. konf. molodykh uchenykh, studentiv i kursantiv «Zakhyst informatsii v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh» [Protection of information in information and communication systems: collection. theses of reports of the III All-Ukrainian science and practice conf. of young scientists, students and cadets "Protection of information in information and communication systems"]*. Lviv, 2019. (pp. 121–122) [in Ukrainian].
13. *Tolkovyi slovar' Dmitrieva [Dmitriev's Explanatory Dictionar]*. (n.d.). Retrieved from <https://dic.academic.ru/dic.nsf/dmitriev/807golosovanie> [in Russian].
14. *Khesh-funktsii [Hash functions]*. (n.d.). Retrieved from <https://sites.google.com/site/anisimovkhv/learning/kripto/lecture/tema9> [in Ukrainian].
15. Yarkova, O. N., & Osipova, A. A. (2014). *Zakhyshchena systema elektronnoho holosuvannia na osnovi kryptohrafichnykh alhorytmiv [A secure system of electronic voting based on*

cryptographic algorithms]. *Visnyk URFO. Bezpeka v informatsiinii sferi [Bulletin of URFO. Security in the information sphere.]*, 2 (12), 9–15 [in Ukrainian].

16. Yatskiv, N. H., & Yatskiv, S. V. (2016). Perspektyvy vykorystannia tekhnolohii blokchein u merezhi internet rechei [Prospects for the use of blockchain technology in the Internet of Things]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy [Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine]*, 26 (8), 381–387. <https://doi.org/10.15421/40260857> [in Ukrainian].

**A. O. Levchenko, S. H. Trutnev, N. P. Ismailova, I. V. Sharipova**

### **SOFTWARE IMPLEMENTATION OF EXPERTS DATA EXCHANGE SUB-SYSTEMS IN DISTRIBUTED COMPLEXES FOR SIMULATION OF COMBAT ACTIONS**

*The comprehensive development of information systems creates conditions for the development and implementation of modern information tools that automate, and thereby more effectively implement management processes. At the same time, due to the increasing complexity of information systems and the information technologies used in them, the volume of requirements for them is growing.*

*One of the directions for introducing IS into modern models of military equipment is information systems control units. Modern information systems control units not only provide control of the military equipment sample, but also provide operational data exchange with the crew. Modern database modeling complexes (such as PEO STRI, the American company "Alion Science & Technology") make it possible to simulate the combat actions of a unit with the exchange of data between the crew (experts).*

*The main role in ensuring the security of accounting subsystems of modern database modeling complexes should be played by well-trying and tested methods of modern cryptography. The use of one or another cryptographic protocol or algorithm should be dictated by necessity and validity.*

*Since in the modern conditions of the development of the Armed Forces of Ukraine in general and in the accounting subsystems of modern database modeling complexes in particular, ensuring secure data exchange is an urgent task, such measures should be taken when exchanging data in which data transmission from each workstation of the system is not available to third parties. persons, therefore it is proposed to use blockchain technology in the field of electronic data exchange.*

*Thus, when exchanging data, such measures are used in which the transfer of data from each workstation of the system was not available to third parties.*

*This process increases the likelihood of eliminating the possibility of data leakage. However, with secure data exchange, this procedure cannot be considered completely adequate, since this method of data exchange cannot be tested on a large number of operators (that is, at the operational-tactical level).*

**Keywords:** *data exchange, workplace data protection modeling, blockchain, information systems, military operations.*

О. Л. Сидорчук

## ПРОБЛЕМАТИКА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ АНТЕН ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ЕФЕКТИВНОЮ ПОВЕРХНЕЮ РОЗСІЮВАННЯ ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ РОЗВІДКИ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

*У статті розглянуто актуальність відомих підходів до зниження радіолокаційної помітності засобів радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби за рахунок зменшення ефективної поверхні розсіювання їх антенних систем з урахуванням досвіду сучасної російсько-української війни.*

*Проаналізовано відомі наближені методи розрахунку розсіювання електромагнітних хвиль антенами, зокрема обчислення інтегральних і диференціальних поверхонь розсіювання, наведено прості формули для оцінювання таких величин.*

*Доведено, що зменшення електромагнітного поля, перевипроміненого об'єктами озброєння та військової техніки за рахунок застосування спеціальних форм, радіопоглинальних матеріалів та покриттів тощо, є непридатним для зниження розсіювання їх антенних систем. Складність полягає в неможливості уникнути перевипромінювання, оскільки за принципом оберненості будь-яка антена розсіює не менше половини падаючої на неї енергії. Отже, має сенс лише трохи зменшити сумарну або інтегральну розсіювальну потужність. Також можна припустити, що заміна антени лінійної поляризації на антену колової поляризації дозволить знизити її радіолокаційну помітність за рахунок зміни напряму відбиття хвилі зондувальної бортової радіолокаційної станції.*

*Рекомендовано для наземних станцій радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби застосувати підхід мініатюризації рупорних опромінювачів їх антенних систем за умови збереження робочих характеристик шляхом зменшення габаритних розмірів, покращення узгодження в антенних трактах та зменшення перевипромінювання від апертури антени. Підбором амплітуди і фази коефіцієнта відбиття у фідерному тракту можна компенсувати тіньове і модове розсіювання та знизити його на 10–20 дБ.*

*Проведені дослідження в подальшому сприятимуть моделюванню антени з новим малогабаритним опромінювачем та дозволять оцінити, наскільки було зменшено її ефективну поверхню розсіювання.*

**Ключові слова:** *радіолокаційна станція; пірамідальний рупорний опромінювач; зменшення ефективної поверхні розсіювання; радіолокаційна помітність; дифракція електромагнітної хвилі.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Досвід операції Об'єднаних сил (антитерористичної операції), останніх воєнних конфліктів та теперішніх бойових дій російсько-української війни свідчить про зростання значущості радіоелектронної розвідки (РЕР) та радіоелектронної боротьби (РЕБ). Застосування засобів РЕР і РЕБ забезпечує

своєчасне виявлення та протидію системам радіолокаційної розвідки повітряного базування (літаків, вертольотів і безпілотних літальних апаратів) [1–5]. Разом з тим технічні засоби РЕР та РЕБ є основними цілями, які виявляють засобами повітряної радіолокаційної розвідки, вони можуть бути уражені в першу чергу. Тому в умовах бойового застосування противником авіації з бортовими радіолокаційними станціями (БРЛС) необхідним є зменшення радіолокаційної помітності наземних сил і засобів РЕР та РЕБ, що налаштовані на розвідку в діапазоні частот повітряних БРЛС.

У загальному випадку радіолокаційна помітність засобів РЕР і РЕБ значною мірою залежить від їх антенних систем. За деяких ракурсів спостереження антени стають джерелом домінуючого вторинного випромінювання і визначають радіолокаційну помітність таких засобів [6–12]. Внесок антен у загальну ефективну площу (поверхню) розсіювання (ЕПР) для окремих зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) у найбільш небезпечному секторі кутів опромінювання може досягати 98% [13]. Тому завдання зменшення радіолокаційної помітності ОВТ РЕР і РЕБ за рахунок зменшення ЕПР їх антенних систем є актуальним.

Значний внесок у радіолокаційну помітність зразків ОВТ здійснюють антени великої апертури, гостронаправлені (дзеркальні, лінзові) та рупорні антени [14–16]. У більшості випадків опромінювачами антенних систем станцій РЕР та РЕБ стають резонансні рупорні антени. Найбільш проблемним завданням є зменшення ЕПР дзеркальних антен із рупорним опромінювачем, який знаходиться у фокусі антенної системи та істотно впливає на її загальну ЕПР.

Відомі підходи зменшення електромагнітного поля, перевипроміненого об'єктами ОВТ за рахунок застосування спеціальних форм, радіопоглинальних матеріалів та покриттів тощо, є непридатними для зниження ЕПР їх антенних систем. Складність полягає в неможливості уникнути перевипромінювання, оскільки за принципом оберненості будь-яка антена розсіює не менше половини падаючої на неї енергії [17–18].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням розсіювальних властивостей антен, методам зменшення їх радіолокаційної помітності та оцінюванню внеску окремих елементів конструкцій у загальну ЕПР антенних систем приділяли увагу багато вчених, наприклад: У. Р. Стоун, Р. С. Хансен, П. Я. Уфімцев, Л. С. Бененсон, Я. Н. Фельд, О. І. Сухаревський, Я. О. Белевищук, В. О. Василець та інші. Проте застосування відомих методів зменшення ЕПР антен є досить проблематичним для засобів РЕР та РЕБ, оскільки призводить до погіршення основних характеристик їх антенних систем, зокрема коефіцієнта спрямованої дії. Впровадження таких методів зазвичай потребує оптимізації за комплексним критерієм “ефективність – помітність”, що неприпустимо для станцій РЕР та РЕБ. Так, зменшення коефіцієнта спрямованої дії їх приймальних антен призведе до зменшення максимальної дальності розвідки за головною та бічними пелюстками діаграми спрямованості антени БРЛС [19].

Отже, **метою статті** є дослідження відомих методів оцінювання конструкцій антени зі зменшеною ЕПР для зниження радіолокаційної помітності засобів РЕР і РЕБ за рахунок зменшення помітності їх антенних систем, а також попереднє оцінювання характеристик розсіювання дзеркальних антен з рупорним опромінювачем.

**Виклад основного матеріалу.** Проектування конструкцій антен зі зменшеною ЕПР належить до класу задач дифракції електромагнітної хвилі (ЕМХ) на тілах складної форми [20]. У разі падіння ЕМХ на такі об'єкти первинні хвилі можуть відбиватися, заломлюватися, частина енергії може поглинатися, у результаті чого змінюється структура первинної хвилі. Задачі виявлення впливу різних об'єктів на структуру електромагнітного поля є задачами дифракції.

Постановка дифракційних задач може бути досить різноманітною. Наприклад, вважатимемо, що розглядаються задачі дифракції монохроматичних ЕМХ на тілах, розміщених у безмежному однорідному ізотропному середовищі. Тіла можуть бути металевими (каркас рупора), діелектричними (фазуюча пластина всередині рупора), дифракція може відбуватися на отворах різної форми в нескінченних металевих екранах (прорізани гантелеподібні щілини) тощо. Вектори  $\mathbf{E}_n$ ,  $\mathbf{H}_n$  падаючої хвилі вважають відомими (рис. 1) [20].

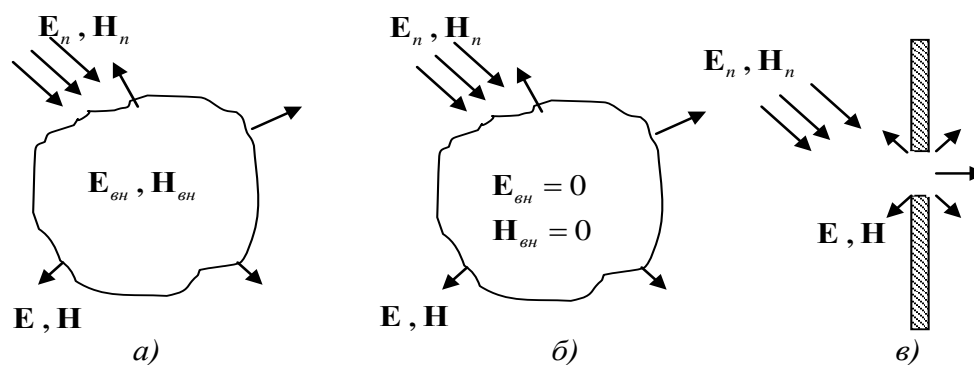


Рис. 1. До постановки задачі дифракції ЕМХ на діелектричній поверхні (а), металевій поверхні (б), отворі (в)

Усередині діелектричного тіла збуджується внутрішнє поле дифракції  $\mathbf{E}_{en}$ ,  $\mathbf{H}_{en}$ , яке дорівнює нулю на ідеально провідних тілах. Поза об'єктами дифракції збуджується зовнішнє поле дифракції  $\mathbf{E}_p$ ,  $\mathbf{H}_p$  (поле розсіювання). Повне поле  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  поза об'єктами, тобто поле розсіювання, знаходимо як суму векторів [20]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_n + \mathbf{E}_p, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_n + \mathbf{H}_p. \quad (1)$$

Щоб задане поле відповідало вимогам теореми єдності [20], воно має задовольняти граничні умови на поверхні  $S$  об'єкта дифракції для рис. 1а:

$$[\mathbf{E}, \mathbf{e}] = [\mathbf{E}_p, \mathbf{e}]; \quad [\mathbf{H}, \mathbf{e}] = [\mathbf{H}_p, \mathbf{e}]. \quad (2)$$

Для випадку, зображеного на рис. 1б, якщо об'єкт розсіювання ідеально провідний, то

$$[\mathbf{E}, \mathbf{e}] = [\mathbf{E}_p, \mathbf{e}] = 0, \quad [\mathbf{H}, \mathbf{e}] = [\mathbf{H}_p, \mathbf{e}] = \mathbf{j}_s, \quad (3)$$

де  $\mathbf{j}_s$  – поверхнева густина струму на поверхні  $S$ .



Запропонована постановка задач дифракції дозволяє проаналізувати та оцінити електромагнітні процеси, характерні для таких об'єктів, як: перешкоди, у разі поширення ЕМХ; відбивачі; екрани; антени; радіолокаційні цілі тощо [17, 18].

Для оцінювання дифракційних процесів залежно від об'єктів дифракції, як правило, вводиться низка інтегральних характеристик, наприклад: поперечний переріз розсіювання, поперечний переріз проходження або інші.

У довіднику з антенної техніки [18] та інших джерелах [17, 20] зазначають, що розсіювальні властивості антен так само, як й інших тіл, прийнято описувати ефективними поперечниками (площею або поверхнею) розсіювання:

однопозиційним (моностатичним) інтегральним  $\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi)$ ;

двопозиційним (бистатичним) диференціальним  $\sigma_{\sigma}(\theta, \phi, \theta', \phi')$ .

Також ЕПР описують матрицею розсіювання  $M$  та коефіцієнтом спрямованої дії двопозиційної діаграми розсіювання:  $D^r(\theta, \phi, \theta', \phi') = \frac{4\pi P_r}{P_{\Sigma}} = \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{\Sigma}}$ .

Поперечники розсіювання характеризують повні потужності, що розсіюються тілом в усьому тілесному куті  $4\pi P_{\Sigma}(\theta, \phi)$ , помножені на одиницю тілесного кута в напрямку  $\theta', \phi', P_r(\theta, \phi, \theta', \phi')$ , за опромінювання тіла плоскою хвилею, що падає в напрямку  $\theta, \phi$ . Ці поперечники визначають у такий спосіб [17]:

$$\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi) = \frac{P_{\Sigma}(\theta, \phi)}{|\operatorname{Re} \Pi(\theta, \phi)|}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\sigma}(\theta, \phi, \theta', \phi') = \frac{4\pi P_r(\theta, \phi, \theta', \phi')}{|\operatorname{Re} \Pi(\theta, \phi)|}, \quad (5)$$

де  $\Pi$  – вектор Пойнтінга падаючої хвилі (для плоскої хвилі  $\operatorname{Re} \Pi = |\Pi|$ ).

Величини  $\sigma_{\Sigma}$  та  $\sigma_{\sigma}$ , що мають розмірність площі, дорівнюють нормальним до вектора  $\Pi$  площинам, через які падаючою хвилею переносяться потужність  $P_{\Sigma}$  та  $P_r$  відповідно.

У випадку двомірної задачі  $\sigma_{\Sigma}$  та  $\sigma_{\sigma}$  – погонні величини, що мають розмірність довжини. Величина  $\sigma_{\Sigma}$  є функцією напрямку  $\theta, \phi$  приходу падаючої хвилі, а величина  $\sigma_{\sigma}$ , крім того, залежить і від напрямку  $\theta', \phi'$  спостереження, тобто є двопозиційною [17].

Найбільший практичний інтерес становлять диференціальні поверхні  $\sigma_T$  тінювого (за напрямом первинної хвилі) і  $\sigma_{звор}$  зворотного, тобто радіолокаційного (назустріч первинній хвилі), розсіювання.

Оскільки  $P_{\Sigma} = \int_{\Omega} P_r(\theta, \phi; \theta', \phi') d\Omega'$ , то

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \sigma_{\sigma}(\theta, \phi; \theta', \phi') d\Omega' \equiv \bar{\sigma}_{\sigma}, \quad (6)$$

де  $\Omega$  – одинична сфера.

З (4), (5) випливає, що

$$\frac{\sigma_{\partial}}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{4\pi\sigma_{\partial}P_r(\theta, \varphi; \theta', \varphi')}{P_{\Sigma}(\theta, \varphi)} \equiv D_r(\theta, \varphi; \theta', \varphi'). \quad (7)$$

Отже,

$$\sigma_{\partial} = \sigma_{\Sigma}D_r, \quad (8)$$

де  $D_r$ , за аналогією з коефіцієнтом спрямованої дії (КСД) антени, можна назвати КСД розсіювання. Очевидно, що

$$\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi) = \frac{\sigma_{np}(\theta, \phi)P_{\Sigma}(\theta, \phi)}{P_{np}(\theta, \phi)}, \quad (9)$$

де  $P_{np}$  – потужність, прийнята антеною;

$$\sigma_{np} \equiv \frac{P_{np}}{\text{Re}\Pi} \text{ – ефективна поглинальна поверхня антени;}$$

Поляризації перевипроміненого і первинного полів, як правило, різні. Зв'язок між ними описують за допомогою дев'ятикомпонентних (у загальному випадку) матриць розсіювання, різних для кожного їх напрямку.

Для зворотного розсіювання матриці є чотирикомпонентними (2-го роду)  $\sigma_{ik}$  ( $i, k = 1, 2$ )  $M$ , елементами яких є часткові диференційні поперечники розсіювання, що відповідають  $k$ -й компоненті електричного вектора розсіювання поля, у разі опромінювання  $i$ -ю компонентою падаючої хвилі [17]. Величини  $\sigma_{ik}$  – також двопозиційні функції, тобто залежать як від  $\theta, \phi$ , так і від  $\theta', \phi'$ . Для зворотного розсіювання справедливі співвідношення симетрії

$$\sigma_{ik} = \sigma_{ki} \quad (10)$$

та інваріантності, що полягає в незалежності «сліду» матриці  $M$ , яка дорівнює  $\sigma_{11} + \sigma_{22} + 2\sigma_{12}$ , від вибору поляризаційного базису, у якому подаються падаюче і розсіяне поля [18]. У загальному випадку  $\sigma_{12} \neq 0$ , отже, у розсіяному полі є крос-поляризаційна компонента, однак завжди можна ввести такий поляризаційний базис (свій для кожного напрямку  $\theta, \phi$ ), що матриця розсіювання буде діагональною і  $\sigma_{12} = 0$ . Наприклад, за нормального падіння плоскої хвилі на металеву площину, такий базис утворить дві будь-які взаємно ортогональні лінійні поляризації. З цього випливає, що за відбиття таких хвиль крос-поляризації не виникає. Але в базисі колових поляризацій  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$ ,  $\sigma_{12} \neq 0$ . Це пояснюється тим, що в разі відбиття від металевої площини хвилі, яка падає до неї по нормалі та має колову поляризацію, вона змінює напрям обертання на протилежний. Проте, якщо антена є лінійним вібратором, то  $\sigma_{22} = \sigma_{12} = 0$ ,  $\sigma_{11} \neq 0$  [17, 18].

З огляду на розсіювання антенами падаючого на них поля, із зазначеного вище можна зробити висновок, що будь-яка антена, незалежно від ступеня узгодження її з навантаженням, розсіює у простір значну частину падаючої на неї енергії. Легко довести (7), (8), що, якщо в антенну систему надходить деяка потужність, це може мати місце лише за наявності розсіювання. Іншими словами, якщо антена не розсіює, то вона нічого й не приймає [17–20]. Тому має сенс лише трохи зменшити сумарну або інтегральну розсіювальну потужність. Також можна припустити, що заміна антени лінійної поляризації на антену колової дозволить зменшити її радіолокаційну помітність за рахунок зміни напрямку відбиття хвилі зондуючої БРЛС.

У тій чи іншій мірі такі причини розсіювання мають місце в будь-яких антенах. Розсіювання елементами конструкції рупорних антен у загальному випадку аналізувати складно. Воно проявляється в рупорній антені та в низці випадків здебільшого за опромінювання антени збоку [21–24].

Розглянемо розсіювання, що має місце в разі опромінення антени в зоні головної пелюстки діаграми спрямованості.

Пояснення тіньового розсіювання як компенсуючого первинну хвилю за антеною та інтегральну характеристику недостатньо. Його джерелами, очевидно, є електричні струми, що наводяться на зовнішній стороні металеві поверхні антени, а також еквівалентні електричні та магнітні струми в її розкриві.

Реальна рупорна антена крім розкриву, що може бути у відомому сенсі аналогом чорної пластини, має додаткові металоелементи, а саме бокові стінки, на яких падаючою хвилею наводяться струми, що створюють нібито антену біжучої хвилі. Оскільки ці струми направлені протилежно збудженим у режимі передачі на внутрішній поверхні стінок, то і напрям розсіювання буде зворотним відносно випромінювання в режимі передачі та здійснюватиме внесок у тіньове розсіювання. Струми, що відповідають за тіньове розсіювання, вочевидь, можуть створювати деякий рівень розсіювання й у зворотний півпростір [25].

Поблизу гострих кромek металеві поверхні антени крім струмів, що враховуються в наближенні Кіргофа та паралельні кромці, наводяться так звані нерівномірні струми. Викликане ними поле розсіювання має вигляд циліндричних хвиль, що розходяться.

Додаткове зворотне розсіювання відповідає частині інтегрального ЕПР, що дорівнює  $(1-q)s_{\perp}$ , де  $q$  – коефіцієнт, який характеризує узгодження апертури та приймача з антеною. Отже, у разі короткозамкненої антени  $q \rightarrow -1$ , а  $\sigma_{\Sigma} \approx 2s_{\perp}$ . Якщо розкрив поглинає всю потужність, що на нього падає, то  $q \rightarrow 1$ , а  $\sigma_{\Sigma} \approx s_{\perp}$  [17, 18].

У конструкціях реальних апертурних антен неможливо забезпечити  $q=1$ . Так, у дзеркальних і лінзових антенах  $q$  може знизитися до 0,3, у хвилеводі й рупорних антенах може становити від 0,5 до 0,8 [17, 18]. Отже, зворотне розсіювання буде мати місце у будь-якій антені. До того ж вказані значення  $q$  реалізуються лише для напрямків головного максимуму її діаграми спрямованості. Для інших напрямків величина  $q$  буде ще нижчою (порівняно з рівномірним синфазним розкривом) [17, 18].

Відомо, що для рупорних антен можна визначити форму діаграми частини зворотного розсіювання [17, 18], що зумовлено незбігом у розкриві антени розподілень: первинного

поля (у режимі приймання) і поля в антені поблизу розкриву (що найчастіше збігається з розподіленням, збудженим у режимі передавання основної хвилі одномодового фідера). При цьому розподілення первинного поля в розкриві розкладається за системою власних парціальних хвиль рупора. Основна з них використовується у фідерному тракту (хвилеводі), їй відповідає поглинальна потужність  $\sigma = qs_{\perp}$  (якщо хвилевід узгоджений із трактом). На частку інших хвиль приходиться потужність, що приблизно дорівнює  $(1-q)s_{\perp}$ , оскільки є й інші джерела зворотного розсіювання. Кожна з них відбивається всередині рупора і перевипромінюється аналогічно його збудженню відповідною гармонікою. Їх діаграми розсіювання будуть багатопелюстковими. У разі зміни ракурсу опромінювання рупора амплітуди їх гармонік і, відповідно, розсіяна ними потужність змінюється (але парціальні діаграми є незмінними). Таке розсіювання прийнято називати модовим [18].

Для дзеркальних антен з рупорним опромінювачем аналогічні міркування можуть бути також застосовані з метою оцінювання розсіювання від опромінювача [19]. Крім того, необхідно розглядати і розсіювання від поверхні дзеркала за рахунок наведених на ньому струмів. Частина поля, що випромінюється такими струмами, збирається у фокальній плямі й за відсутності опромінювача розсіюється у вигляді досить широкого пучка. Інша частина розповсюджується безпосередньо. При цьому кривизна поверхні дзеркала спричинить у перевипроміненому полі і кросполяризаційну компоненту [19].

Якщо рупорна антена опромінюється в секторі головної пелюстки її діаграми спрямованості, а приймальний тракт повністю неузгоджений із антеною, то потужність, що проходить у тракт, буде повністю відбиватися. Частина інтегральної ЕПР, що зумовлена таким розсіюванням, дорівнюватиме  $\sigma_{\Sigma}^1 = qs_{\perp}$ , а відповідна йому диференціальна ЕПР  $\sigma_{\phi}^1$  у секторі діаграми спрямованості на передачу, згідно з формулою (3), матиме такий вигляд [17, 18]:

$$\sigma_{\phi}^1(\theta, \phi, \theta', \phi') = q(\theta, \phi)s_{\perp}D(\theta', \phi') = s_{ef}(\theta, \phi)D(\theta', \phi'), \quad (11)$$

де  $q(\theta, \phi)$  відповідає опроміненню у напрямку  $\theta, \phi$ ;

$D(\theta', \phi')$  – КСД антени в режимі передачі в напрямку спостереження  $\theta', \phi'$ ;

$s_{ef}$  – ефективна площа антени,  $s_{ef} = qs_{\perp}$ .

За часткової неузгодженості антен із навантаженням в (11) необхідно ввести еквівалентний коефіцієнт відбиття основної гармоніки за потужністю  $|\Gamma|^2 \leq 1$  [17, 19]:

$$\sigma_{\phi}^1(\theta, \phi, \theta', \phi') = s_{ef}(\theta, \phi)D(\theta', \phi')|\Gamma|^2, \quad (12)$$

де  $\Gamma$  – коефіцієнт відбиття основної гармоніки за потужністю.

Величину  $\sigma_{\phi}^1$  легко можна знайти за параметрами антени в режимі приймання та передачі. Хоча вона й не дорівнює істинній диференційній ЕПР [17, 18]:

$$\sigma_{\phi}(\theta, \phi, \theta', \phi') = \sigma_{\Sigma}(\theta, \phi)D'(\theta, \phi, \theta', \phi'), \quad (13)$$

її часто використовують для наближених розрахункових оцінок  $\sigma_o$ . Це допустимо, коли  $|\Gamma|^2 \approx 1$  і лише у вузькому секторі кутів поблизу максимуму діаграми спрямованості на передачу. За  $|\Gamma|^2 \ll 1$  така оцінка взагалі буде хибною.

На практиці часто обмежуються дослідженнями однопозиційної диференційної ЕПР [17, 18] (поперечником зворотного розсіювання)  $\sigma_o(\theta, \phi)$ , коли напрям спостереження протилежний напрямку опромінення. При цьому формули (12) та (13) набувають такого вигляду:

$$\sigma_o^1(\theta, \phi) = s_{ef}(\theta, \phi) D(\theta, \phi) |\Gamma|^2, \quad (14)$$

$$\sigma_o(\theta, \phi) = \sigma_\Sigma(\theta, \phi) D^r(\theta, \phi). \quad (15)$$

Як відомо із практики [17], графіки  $\sigma_o^1(\theta, \phi)$  та  $\sigma_o(\theta, \phi)$  суттєво відрізняються особливо за  $|\Gamma|^2 \ll 1$ . Дійсно, крива  $\sigma_o^1(\theta, \phi)$  незалежно від величини  $|\Gamma|^2$  має куполоподібну форму з максимумом за  $\theta = \theta_{\max}$ ,  $\phi = \phi_{\max}$ , повторюючи залежність від цих кутів  $s_{ef}D$  (величина  $|\Gamma|^2$  від  $\theta, \phi$  не залежить), а крива  $\sigma_o(\theta, \phi)$  за  $|\Gamma|^2 \ll 1$ , навпаки, у даному напрямку буде мати мінімум (що дорівнює приблизно  $\sigma_o^1(\theta_{\max}, \phi_{\max})$ ). За відхилення від цього напрямку  $\sigma(\theta, \phi)$  досить різко збільшиться відповідно до зростання модового розсіювання. Це підкреслює обмеженість застосування формул (11), (12), (14).

Оскільки  $s_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D$ , то (14) можна подати в еквівалентному вигляді [17, 18]:

$$\sigma_o^1(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} |\Gamma|^2 [D(\theta, \phi)]^2, \quad (16)$$

звідки видно, що головна пелюстка антени  $\sigma_o^1(\theta, \phi)$  (а також  $\sigma_o(\theta, \phi)$  за  $|\Gamma|^2 \approx 1$ ) відповідає квадрату її діаграми спрямованості в режимі передачі. Такі висновки підтверджено даними вимірювань [21–23]. У короткозамкненого пірамідального рупора  $\sigma_o(\theta_{\max}, \phi_{\max})$  суттєво менше  $\sigma_o(\theta_{\max}, \phi_{\max})$  рівновеликої розкриву рупора металевої пластини на 6–10 дБ. Це пояснюється тим, що пластини збуджується синфазно, тоді як компоненти зворотного розсіювання рупора розфазовані. Якщо рупор узгоджено з навантаженням (за основною гармонікою), то  $\sigma_o(\theta_{\max}, \phi_{\max})$  знизиться іще на 10–20 дБ. Підбором амплітуди і фази коефіцієнта відбиття у фідерному тракті можна компенсувати у цьому напрямку тіньове і модове розсіювання та знизити  $\sigma_o$  ще на 10–20 дБ [17, 22, 23].

Опромінювач може бути виготовлено у вигляді малогабаритного пірамідального рупора зі щільним відведенням основної моди, поглинанням хвиль вищих гармонік, узгодженим навантаженням, а також діелектричною пластинною, як фазообертач для

колової поляризації. Варіанти таких конструкцій запропоновано в патентах на винахід [24, 25]. Введені обмеження дозволять кількісно оцінити зменшення ЕПР нової антени, зокрема за допомогою математичної моделі, запропонованої у патенті на винахід [26] або у [22, 27].

Подальші дослідження можна обмежити тактико-технічними характеристиками станцій РЕР або РЕБ, більшість з яких працює за бортовими РЛС у діапазоні частот 10–15 ГГц та однопозиційною ЕПР:

$$G_A = const; \lambda \in [0,02 - 0,03], \text{ м}; n = const, s_{\text{ef}}(\theta, \phi) \rightarrow \min; F_{\text{БП}} \leq F_{\text{БП}_0}, \quad (17)$$

де  $G_A$  – коефіцієнт підсилення антени;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$n$  – кількість рупорних опромінювачів з однаковими параметрами, шт.;

$F_{\text{БП}}$  – рівень бічних пелюсток;

$F_{\text{БП}_0}$  – оптимальний рівень бічних пелюсток.

Для побудови нової антени необхідно забезпечити

$$\sigma_{\Sigma}(\theta, \phi), \text{ м}^2 \rightarrow \min; \sigma_{\theta}^1(\theta, \phi), \text{ м}^2 \rightarrow \min; \sigma_{\theta}(\theta, \phi), \text{ м}^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

із урахуванням розглянутих вище причин розсіювання енергії антеною з метою зменшення її радіолокаційної помітності.

**Висновки.** Проведено дослідження відомих методів оцінювання конструкцій антени зі зменшеною ЕПР. Для проєктування антен зі зниженою радіолокаційною помітністю розглянуто можливі варіанти постановки дифракційних задач, які дозволять проаналізувати та оцінити електромагнітні процеси, характерні для таких об'єктів.

Під час попереднього оцінювання диференціальної  $\sigma_{\theta}(\theta, \phi)$  та інтегральної  $\sigma_{\Sigma}$  характеристик розсіювання дзеркальних антен з рупорним опромінювачем встановлено, що причини розсіювання зумовлені:

затіненням, яке вносить сама антена;

зворотним розсіюванням полів апертурою антени;

відбиттям від приймача;

розсіюванням на зовнішніх елементах конструкції [19, 23];

розсіюванням на гострих кромках рупора [28];

неузгодженням поляризації первинного поля і поля антени [9, 29].

З урахуванням специфіки наземних станцій РЕР та РЕБ для проєктування нової антенної системи доцільно застосувати підхід мініатюризації її рупорних опромінювачів за умови збереження робочих характеристик за рахунок зменшення габаритних розмірів, покращення узгодження в антенних трактах, зниження рівня перевипромінювання від апертури антени, а також покращення її поляризаційних характеристик [24–29].

**СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Шумигай О. В., Єрмоленко О. В. Сучасний стан багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби. Тенденції та перспективні напрями їх розвитку // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2020. Т. 5, № 3. С. 119–125. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.14>
2. Живець Ю. М., Єрмоленко О. В., Коваль В. В. Обґрунтування доцільних варіантів застосування засобів зниження помітності військової техніки Збройних Сил України, захисту персоналу та спорядження від технічних засобів радіолокаційної та оптико-електронної розвідки // Зб. наук. праць Держ. наук.-дослід. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2020. Т. 5, № 3. С. 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.046>
3. Сидорчук О. Л. Підвищення живучості військової техніки методами радіоелектронної боротьби і зниження помітності // Тези доп. наук.-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції». Житомир : ЖВІ, 2016. С. 55.
4. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / Под ред. О. И. Сухаревского. Харьков : ХУВС, 2009. 466 с.
5. Сидорчук О. Л., Денисюк А. Ю., Шостак І. М. Вплив зменшення ефективної поверхні розсіювання антен на системи радіолокаційної розвідки та радіоелектронної боротьби // Тези доп. наук.-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення». Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. С. 95–96.
6. 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.
7. Сидорчук О. Л. Підхід до захисту зенітно-ракетних комплексів від ураження шляхом зменшення ефективної поверхні розсіювання їх антенних систем // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2017. Вип. 14. С. 157–170.
8. Залевский Г. С. Обзор методов расчета вторичного излучения радиолокационных объектов // Системы обработки информации : зб. наук. праць. Харків : ХУПС, 2007. Вип. 7 (65). С. 16–24.
9. Сидорчук О. Л. Метод покращення поляризаційних характеристик антенних систем переносних станцій наземної розвідки // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2018. Вип. 15. С. 78–93.
10. Сидорчук О. Л. Математичний апарат дослідження амплітуд поля, збудженого антенною системою радіолокаційної станції 1РЛ133 «Кредо» // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2016. Вип. 13. С. 62–72.
11. Husnu Deniz Basdemir. Gaussian source beam diffraction by a perfect electromagnetic half-plane // Journal of the Optical Society of America. 2020. Vol. 37, Iss. 6. P. 930–939. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.389239>

12. Jiyeon Lee, Sanghoon Kim, Aobo Li, Dan Sievenpiper. Shield pattern and scattering reduction scheme using impedance surfaces // IOP Publishing Ltd Journal of Physics D: Applied Physics. 2021. Vol. 54, N 47. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2173>
13. Белевищук Я. О., Василець В. О., Нечитайло С. В. Метод розрахунку ефективної поверхні розсіювання наземної техніки, оснащеної багатоелементними антенами // Авиационно-космическая техника и технологии. Харків : ХУПС, 2009. № 8 (65). С. 169–174.
14. 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. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2011-2\(57\)-103-113](https://doi.org/10.26642/tn-2011-2(57)-103-113)
15. Jiang W., Hong T. and Gong S. X. Research on the Scattering Characteristics and the RCS Reduction of Circularly Polarized Microstrip Antenna // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation. 2013. Article ID 735847, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/735847>
16. Сидорчук О. Л. Дослідження амплітуд поля, збудженого лінійною решіткою рупорних опромінювачів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратуробудування». 2016. Вип. 67. С. 5–11. <https://doi.org/10.20535/radap.2016.67.5-11>
17. Бененсон Л. С., Фельд Я. Н. Рассеяние электромагнитных волн антеннами (обзор) // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 2. С. 225–246.
18. Справочник по антенной технике: в 5 т. Т. 1 / Л. Д. Бахрах, Л. С. Бененсон, Е. Г. Зелкин и др.; под ред. Я. Н. Фельда, Е. Г. Зелкина. Москва : ИПРЖР, 1997. 256 с.
19. Сидорчук О. Л. Метод визначення електромагнітного поля, розсіяного від рупорного опромінювача, розташованого у фокусі параболоїда обертання антенної системи станцій наземної розвідки // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2019. Вип. 16. С. 80–93. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.16.08>
20. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення радіохвиль : Підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2010. 435 с.
21. Choi W., Kwak B., Nam Y. Radar absorbing serrated edge for broadband radar cross-section reduction // Microw Opt Technol Lett. 2020. Vol. 62, Iss. 3. P. 1112–1116. <https://doi.org/10.1002/mop.32152>
22. Кореновская О. Л., Манойлов В. Ф., Никитчук Т. М., Сидорчук О. Л. Моделирование и экспресс-методика измерения диаграмм рупорных антенн // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Радіотехніка. Радіоапаратуробудування». 2015. Вип. 62. С. 31–39. <https://doi.org/10.20535/radap.2015.62.31-39>
23. Манойлов В. П. Сидорчук О. Л. Снижение ЭПР рупорной антенны для широкого сектора углов наблюдения // Тезисы Междунар. крымской науч.-практ. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо-2012). Севастополь, 2012. Т. 2. С. 487–488.
24. Рупорна антена колової поляризації : патент на винахід № 96661 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01) / В. П. Манойлов, О. Л. Сидорчук ; заявл. 06.04.2010 ; опубл. 25.11.11, Бюл. № 22. 6 с.



25. Рупорна антена : патент на винахід № 97037 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01) / В. П. Манойлов, О. Л. Сидорчук ; заявл. 06.07.2010 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24. 6 с.
26. Система для непрямого визначення антенної складової ефективною поверхні розсіювання апертурних антен : патент на винахід № 06557 /UA/ H01Q 13/02 (2006.01) / В. П. Манойлов, О. Л. Сидорчук ; заявл. 31.05.2013 ; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17. 4 с.
27. Артюшин Л. М., Куртсеітов Т. Л., Мирненко В. І., Сидорчук О. Л. Можливості застосування протирадіолокаційних покриттів у антенних системах засобів озброєння та військової техніки з метою зменшення їх радіолокаційної помітності // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони. Київ : НУОУ, 2016. Вип. 2 (26). С. 104–109.
28. 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. Радіоапаратуробудування». 2022. Вип. 89. С. 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAR.2022.89.11-20>
29. Сидорчук О. Л. Метод проектування радіолокаційних станцій наземної розвідки з антенною системою колової поляризації // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони. Київ : НУОУ, 2018. № 3 (33) С. 25–35.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2022.

## REFERENCES

1. Shumyhai, O. V., & Yermolenko, O. V. (2020). Suchasnyi stan bahatofunktsionalnykh zasobiv ta kompleksiv radioelektronnoi borotby. Tendentsii ta perspektyvni napriamy yikh rozvytku [The current state of multifunctional means and complexes of radio-electronic warfare. Trends and prospective directions of their development]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Collection. of science works of the Govt. scientific research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, Vol. 5, № 3, 119–125. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.14> [in Ukrainian].
2. Zhyvets, Yu. M, Yermolenko, O. V, & Koval, V. V. (2020). Obgruntuvannia dotsilnykh variantiv zastosuvannia zasobiv znyzhennia pomitnosti viiskovoi tekhniky Zbroinykh Syl Ukrainy, zakhystu personalu ta sporiadzhennia vid tekhnichnykh zasobiv radiolokatsiinoi ta optyko-elektronnoi rozvidky [Justification of expedient options for the use of means of reducing the visibility of military equipment of the Armed Forces of Ukraine, protecting personnel and equipment from technical means of radar and optical-electronic intelligence]. *Zb. nauk. prats Derzh. nauk.-doslid. in-tu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Collection. of science works of the Govt. scientific research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment]*, Vol. 5, № 3, 33–40. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.5.2020.046> [in Ukrainian].
3. Sydorchuk, O. L. (2016). Pidvyshchennia zhyvuchosti viiskovoi tekhniky metodamy radioelektronnoi borotby i znyzhennia pomitnosti [Increasing the survivability of military equipment by the methods of radio-electronic warfare and reducing visibility]. In *Tezy dop. nauk.-prakt. konf. «Problemy stvorennia, rozvytku ta zastosuvannia vysokotekhnolohichnykh system spetsialnoho pryznachennia z urakhuvanniam dosvidu antyterorystychnoi operatsii»*

[Theses add. science and practice conf. "Problems of creation, development and application of high-tech special-purpose systems, taking into account the experience of anti-terrorist operations."]. (pp. 55). Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

4. Sukharevskii, O. I. (Eds.). (2009). *Rasseianie elektromagnitnykh voln vozdushnymi i nazemnymi radiolokatsionnymi ob"ektami* [Scattering of electromagnetic waves by air and ground radar objects]. Khar'kov [in Russian].

5. Sydorchuk, O. L., Denysiuk, A. Yu., & Shostak, I. M. (2014). Vplyv zmenshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia anten na systemy radiolokatsiinoi rozvidky ta radioelektronnoi borotby [The effect of reducing the effective scattering surface of antennas on the systems of radar reconnaissance and radio-electronic warfare]. In *Tezy dop. nauk.-prakt. konf. «Problemy stvorennia, rozvytku ta zastosuvannia informatsiinykh system spetsialnoho pryznachennia»* [Theses add. science and practice conf. "Problems of creation, development and application of special purpose information systems"]. (pp. 95–96). Zhytomyr : ZhMI DUT [in Ukrainian].

6. Sydorchuk, O. L. (2012). Analiz metodiv i sposobiv zmenshennia 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].

7. Sydorchuk, O. L. (2017). Pidkhid do zakhystu zenitno-raketnykh kompleksiv vid urazhennia shliakhom zmenshennia efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia yikh antenykh system [An approach to protecting anti-aircraft missile systems from damage by reducing the effective scattering surface of their antenna 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], 14, 157–170. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

8. Zalevskii, G. S. (2007). Obzor metodov rascheta vtorychnogo 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].

9. Sydorchuk, O. L. (2018). Metod pokrashchennia poliaryzatsiinykh kharakterystyk antenykh system perenosnykh stantsii nazemnoi rozvidky [A method for improving the polarization characteristics of antenna systems for portable ground reconnaissance stations]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats ZhVI* [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute], 15, 78–93. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

10. Sydorchuk, O. L. (2016). Matematychnyi aparat doslidzhennia amplitud polia, zbudzhenoho antennoiu systemoiu radiolokatsiinoi stantsii 1RL133 «Kredo» [Mathematical apparatus for studying the amplitudes of the field excited by the antenna system of the radar station 1RL133 "Credo"]. *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], 13, 62–72. Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].

11. Husnu Deniz Basdemir. (2020). Gaussian source beam diffraction by a perfect electromagnetic half-plane. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 37, Iss. 6, 930–939. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.389239>
12. Jiyeon Lee, Sanghoon Kim, Aobo Li, & Dan Sievenpiper. (2021). Shield pattern and scattering reduction scheme using impedance surfaces. *IOP Publishing Ltd Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 54, N 47. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2173>
13. Belevyshchuk, Ya. O., Vasylets, V. O., & Nechytailo, S. V. (2009). Metod rozrakhunku efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia nazemnoi tekhniki, osnashchenoi bahatoelementnyimi antenami [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].
14. Sydorchuk, O. L. (2011). Rozrakhunok efektyvnosti poverkhni rozsiuvannia rupornoj 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) Zhytomyr [in Ukrainian].
15. Jiang, W., Hong, T., & Gong S. X. (2013). Research on the Scattering Characteristics and the RCS Reduction of Circularly Polarized Microstrip Antenna. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, Article ID 735847, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/735847>
16. Sydorchuk, O. L. (2016). Doslidzhennia amplitud polia, zbudzenoho liniinoiu reshitkoju rupornykh oprominiuvachiv [Study of amplitudes of the field excited by a linear grid of horn irradiators]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «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].
17. Benenson, L. S., & Fel'd, Ia. N. (1988). Rasseianie elektromagnitnykh voln antennami (obzor) [Scattering of electromagnetic waves by antennas (review)]. *Radiotekhnika i elektronika [Radio engineering and electronics]*, Vol. 33, № 2, 225–246 [in Russian].
18. Bakhrakh, L. D., Benenson, L. S., & Zelkin, E. G., et al. (1997). *Spravochnik po antennoi tekhnike [Antenna Engineering Handbook]*. (Vols. 1–5). Moscow [in Russian].
19. Sydorchuk, O. L. (2019). Metod vyznachennia elektromagnitnoho polia, rozsiianoho vid rupornoho oprominiuvacha, roztashovanoho u fokusi paraboloida obertannia antennoi systemy stantsii nazemnoi rozvidky [Method for determining the electromagnetic field scattered from a horn irradiator located in the focus of the paraboloid of rotation of the antenna system of ground reconnaissance stations]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, 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, 80–93. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2019.16.08> Zhytomyr: ZhMI [in Ukrainian].
20. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2010). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia radiokhvyl [Electrodynamics and propagation of radio waves. Part 2. Radiation and propagation of radio waves]*. Kharkiv [in Ukrainian].

21. Choi, W., Kwak, B., & Nam, Y. (2020). Radar absorbing serrated edge for broadband radar cross-section reduction. *Microw Opt Technol Lett*, Vol. 62, Iss. 3, 1112–1116. <https://doi.org/10.1002/mop.32152>
22. Korenovskaia, O. L., Manoilov, V. F., Nikitchuk, T. M., & Sidorchuk, O. L. (2015). Modelirovanie i ekspress-metodika izmereniia diagramm rupornykh antenn [Modeling and Express Method for Measuring Horn Antenna Diagrams]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriiia «Radiotekhnika. Radioaparaturubuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio equipment. Radio equipment construction"]*, 62, 31–39. <https://doi.org/10.20535/radap.2015.62.31-39> [in Russian].
23. Manoilov, V. P., & Sidorchuk, O. L. (2012). Snizhenie EPR rupornoj anteny dlia shirokogo sektora uglov nabliudeniia [Reducing the EPR of a horn antenna for a wide sector of observation angles]. In *Tezisy Mezhdunar. krymskoi nauch.-prakt. konf. «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii» [Abstracts of the International Crimean scientific and practical. conf. "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies"] (KryMiKo-2012)*, Vol. 2. (pp. 487–488). Sevastopol' [in Russian].
24. Manoilov, V. P., & Sydorchuk, O. L. (2011). *Ruporna antena kolovoi poliaryzatsii: patent na vynakhid [Horn antenna of circular polarization: patent for the invention]* № 96661 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01). Stated 06.04.2010; published 25.11.2011, Bulletin № 22. 6 p. [in Ukrainian].
25. Manoilov, V. P., & Sydorchuk, O. L. (2011). *Ruporna antena: patent na vynakhid [Horn antenna: patent for an invention]*. № 97037 /UA/ H01Q 13/10 (2006.01). Stated 06.07.2010; published 26.12.2011, Bulletin № 24. 6 p. [in Ukrainian].
26. Manoilov, V. P., & Sydorchuk, O. L. (2014). *Systema dlia nepriamoho vyznachennia antennoi skladovoi efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia aperturnykh anten: patent na vynakhid [System for indirect determination of the antenna component of the effective scattering surface of aperture antennas: patent for an invention]*. № 06557 /UA/ H01Q 13/02 (2006.01). Stated 31.05.2013; published 10.09.2014, Bulletin № 17. 4 p. [in Ukrainian].
27. Artiushyn, L. M., Kurtseitov, T. L., Myrnenko, V. I., & Sydorchuk, O. L. (2016). Mozhyvosti 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 tekhnologii u sferi bezpeky i oborony [Modern information technologies in the sphere of security and defense]*, 2 (26), 104–109. Kyiv [in Ukrainian].
28. Sydorchuk, O. L., & Zalevskiy, V. Y. (2022). Doslidzhennia dyfraktsii elektromahnitnoi khvyli na kromkakh piramidalnoi rupornoj anteny yak odniiei z prychnyn rozsiuvannia [Investigation of electromagnetic wave diffraction at the edges of a pyramidal horn antenna as one of the causes of scattering]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriiia «Radiotekhnika. Radioaparaturubuduvannia» [Bulletin of NTUU "KPI". The series "Radio equipment. Radio equipment construction"]*, 89, 11–20. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.11-20>
29. Sydorchuk, O. L. (2018). Metod proektuvannia radiolokatsiinykh stantsii nazemnoi rozvidky z antennoiu systemoiu kolovoi poliaryzatsii [Method of designing ground-based radar stations with antenna system of circular polarization]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky i oborony [Modern information technologies in the field of security and defense]*, 3 (33), 25–35. Kyiv [in Ukrainian].

**O. L. Sydorчук**

**CHALLENGES OF EVALUATION METHODS FOR ANTENNAS WITH REDUCED EFFECTIVE SCATTERING SURFACES IN SIGNALS INTELLIGENCE AND ELECTRONIC WARFARE SYSTEMS**

*The article analyses the relevance of well-known approaches to reducing radar visibility of signals intelligence and electronic warfare systems by reducing the effective scattering surfaces of their antenna systems based on the experience of the current Russian-Ukrainian war.*

*The author has analysed known approximate methods used to calculate scattering of electromagnetic waves by antennas, and in particular, how integral and differential scattering surfaces can be calculated. The article provides simple formulas for estimating such values.*

*The author proves that any reduction of the electromagnetic field re-radiated by weapons and military vehicles because of their specific shapes, use of radio-absorbing materials and coatings, etc. doesn't influence the scattering from their antenna systems. Challenging is the impossibility to avoid the above re-radiation, since according to the reciprocal operation principle, any antenna scatters at least half of the energy captured by it. Therefore, it makes sense to reduce the total or integral scattering capacity just a little bit. It can also be assumed that we can reduce the radar visibility of an antenna by replacing a linear polarization antenna with a circular polarization one. It will change the direction of wave reflection on the onboard radar sensor.*

*The author recommends to apply miniaturized horn irradiators for their antenna systems in ground signals intelligence and electronic warfare stations provided that the performance characteristics are preserved by reducing overall dimensions, improving harmonization in antenna paths and reducing re-radiation from the antenna aperture. By selecting the amplitude and phase of the reflection coefficient in the feeder path, you can compensate for shadow and mode scattering and reduce it by 10–20 dB.*

*The conducted study will further contribute to the development of an antenna design with a new small-sized irradiator and will make it possible to assess reduction of its effective scattering surface.*

**Keywords:** *radar; pyramidal horn irradiator; reduction of effective scattering surface; radar visibility; electromagnetic wave diffraction.*

О. С. Бойченко, Д. С. Костерев, І. Ю. Маковський, О. М. Грищук

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ЦІННОСТІ ІНФОРМАЦІЇ УСТАНОВИ

*Статтю присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання – розробці математичної моделі розрахунку цінності інформації установи. Наведено тлумачення таких понять: цінність, рівень важливості, час остаточного старіння інформації та вид права власності на неї, – які застосовують у ході досліджень самого об'єкта захисту. Детально розглянуто показники, за якими пропонується визначати цінність інформації, та доведено її залежність від них. Запропоновано розраховувати цінність інформації як середнє значення суми відповідних коефіцієнтів, кожен з яких обирається за допомогою методу ранжування. Важливість відповідного показника інформації визначається згідно з вимогами керівних документів щодо організації інформаційної безпеки або спеціально створеною групою експертів. Запропоновано використовувати такі коефіцієнти впливу: рівня доступу до інформації, часу остаточного її старіння, важливості інформації та виду права на неї. Проведено перевірку адекватності математичної моделі розрахунку цінності інформації установи. Встановлено, що інформація, яка має найвищий рівень обмеження доступу, найвищий рівень важливості та найвищий рівень права на неї (належать державі), має найбільшу цінність для установи. Наведено приклад, у якому складено список документів, у яких міститься інформація, що потребує захисту в установі, та розраховано значення її цінності. Математична модель розрахунку цінності інформації установи дозволяє обґрунтувати необхідність вжиття додаткових заходів для вдосконалення комплексної системи захисту інформації в автоматизованих системах установи та більш якісно підійти до питання формування моделі загроз інформації в інформаційно-комунікаційних системах.*

**Ключові слова:** цінність інформації; право власності на інформацію; час остаточного старіння інформації; рівень важливості інформації.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Діджиталізація сучасного суспільства спричинила широке використання інформаційних технологій у всіх сферах людської діяльності. Поява інформаційно-комунікаційних систем (ІКС), за допомогою яких автоматизовано процеси накопичення, модифікації, обміну, зберігання інформації, значно спрощує процеси управління повсякденною діяльністю установ за рахунок використання систем електронного документообігу. Такий рівень автоматизації роботи з інформацією в установі зумовлює ризики несанкціонованого доступу (НСД) до неї. Відповідно до [1] захист інформації від НСД в ІКС полягає в забезпеченні дотримання правил розмежування доступу шляхом створення і підтримки в дієздатному стані системи заходів із захисту інформації. Із цією метою в ІКС установ створюються комплексні системи захисту інформації (КСЗІ).

© О. С. Бойченко, Д. С. Костерев, І. Ю. Маковський, О. М. Грищук, 2022

У сучасних КСЗІ в моделі загроз не завжди враховується цінність інформації, а більша увага приділяється порушенню її таких властивостей, як: цілісність, доступність, конфіденційність тощо. Тому в ході обстеження інформаційного середовища під час створення КСЗІ постає важливе науково-практичне завдання щодо розрахунку цінності інформації установи з метою своєчасного проведення організаційно-технічних заходів для забезпечення її захисту.

Виникнення цього важливого науково-практичного завдання зумовлено наявною об'єктивною суперечністю між вимогами до зменшення потенційних збитків від загроз для інформації та принциповою неможливістю їх врахування через чинний порядок обстеження інформаційного середовища, що й визначає своєчасність та актуальність досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нормативні документи з технічного захисту інформації (НД ТЗІ) визначають вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу в ІКС [1–5]. Зокрема, у цих документах окремо визначено характеристики фізичного середовища, обчислювальної системи, оброблюваної інформації та користувачів.

У НД ТЗІ [6] наведено порядок обстеження інформаційного середовища, у якому визначено, що аналізу підлягає вся інформація, яка обробляється та зберігається в ІКС. Під час аналізу вона повинна бути класифікована за режимом доступу, правовим режимом, мають бути визначені й описані види її подання в ІКС.

У НД ТЗІ [7] вказано, що вихідними даними для визначення вимог до заходів, методів та засобів захисту інформації є: завдання та функції ІКС, результати аналізу середовищ функціонування ІКС, модель загроз та модель порушників, а також результати аналізу ризиків.

Отже, у НД ТЗІ не приділено належної уваги питанню впливу цінності інформації на визначення вимог до заходів, методів та засобів її захисту.

У науковій праці [8] автори висвітлили результати аналізу методів визначення цінності та старіння інформації. У роботі встановлено взаємозв'язок між цими поняттями.

У [9, 10] цінність інформації розглядається як міра досягнення мети користувача після її отримання, тобто рівень реалізації цільової функції.

Цінність інформації з погляду захисту інформації визначається ступенем її корисності для власника [11].

На сьогоднішній день відомо чимало підходів до формалізації процесу розрахунку цінності інформації, однак дотепер у цьому процесі залишається значна частка суб'єктивізму. У відкритих джерелах не було запропоновано математичних моделей, які б описували у формалізованому вигляді кількісне значення цінності інформації.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є розроблення математичної моделі розрахунку цінності інформації з урахуванням таких критеріїв, як: рівень важливості інформації, вид права власності на неї, рівень обмеження доступу до інформації та, відповідно, час остаточного її старіння.

**Виклад основного матеріалу.** Під цінністю інформації установи в цьому дослідженні слід розуміти кількісну міру, яка визначає ступінь її корисності для

володільця інформації. Функціональну залежність цінності інформації від її показників можна подати за допомогою такого виразу:

$$VOI = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість показників інформації, що мають вплив на її цінність;

$\alpha_i$  – коефіцієнт, який характеризує кількісну міру впливу  $i$ -го показника інформації на її цінність.

Розрахунок цінності інформації ґрунтується на методах та способах сучасної теорії системного аналізу, яка надає інструментарій для визначення відповідних коефіцієнтів, що приймають значення з відрізка  $[0...1]$ .

Для розрахунку цінності інформації установи пропонуємо математичну модель, яка дозволяє отримати її числове значення шляхом розрахунку середнього значення суми відповідних коефіцієнтів, кожен з яких розраховується за допомогою методу ранжування. Важливість відповідного показника інформації визначається з керівних документів щодо організації інформаційної безпеки або спеціально створеною групою експертів.

Результати аналізу сучасних підходів до визначення цінності інформації свідчать про те, що в математичних моделях її розрахунку не враховано показників інформації, які характеризують ступінь важливості та вид права власності на неї. Тому в даному дослідженні характеризувати цінність інформації пропонуємо за певними показниками. Розглянемо їх детальніше.

1. Рівень обмеження доступу. За цим показником пропонуємо оцінювати вплив грифа обмеження доступу до інформації та часу остаточного старіння інформації на її цінність. Під старінням інформації розуміється втрата достовірності внаслідок змін і появи нових даних.

Відповідно до Закону України “Про інформацію” інформація за порядком доступу поділяється на відкриту та з обмеженим доступом, яка, у свою чергу, може бути конфіденційною, службовою або таємною. Чинним законодавством України передбачено час, через який переглядається інформація щодо віднесення її до таємної чи службової або зняття обмеження доступу до неї. Що стосується конфіденційної інформації, то законодавством України не встановлено терміну обмеження доступу до неї та не встановлено порядку віднесення інформації до конфіденційної. Правила доступу до конфіденційної інформації встановлюють фізичні та юридичні особи, у володінні яких вона перебуває. Конфіденційна інформація може мати велику цінність, втрата або передача якої іншим особам може завдати установі значних збитків [7]. З метою встановлення правил розмежування доступу до конфіденційної інформації необхідно її класифікувати шляхом поділу на декілька категорій за ступенем цінності. Але в дослідженні питання впливу категорій цінності конфіденційної інформації не розглядалося. Тому в статті запропоновано застосовувати рівні обмеження доступу до інформації  $r_i$ , зокрема й до конфіденційної інформації, та часу її остаточного старіння (табл. 1).



За допомогою відомого методу ранжування отримано коефіцієнт впливу грифа обмеження рівня доступу до інформації на цінність інформації  $\beta_1$  та проведено його нормування за таким виразом:

$$\beta_1 = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість рівнів доступу до інформації;

$r_i$  – коефіцієнт, який характеризує важливість  $i$ -го рівня доступу до інформації.

Для отримання коефіцієнта впливу часу остаточного старіння інформації на її цінність для відповідного рівня доступу до інформації  $\beta_2$  пропонуємо використати вираз

$$\beta_2 = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість рівнів доступу до інформації;

$t_i$  – час остаточного старіння інформації  $i$ -го рівня доступу.

Коефіцієнт, який характеризує вплив показника “Рівень обмеження доступу” на цінність інформації,  $\alpha_1$  складається з двох рівнозначних коефіцієнтів  $\beta_1$  та  $\beta_2$ , а його значення є середнім арифметичним значень цих двох коефіцієнтів.

Результати розрахунку коефіцієнта, який характеризує вплив показника “Рівень обмеження доступу” на цінність інформації,  $\alpha_1$  наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Показник “Рівень обмеження доступу”

Інформація за порядком доступу	$r_i$	$\beta_1$	Час остаточного старіння (діб)	$\beta_2$	$\alpha_1$
Особливої важливості	6	0,286	10860	0,566	0,426
Цілком таємно	5	0,238	3620	0,189	0,213
Таємно	4	0,190	1810	0,094	0,142
Для службового користування	3	0,143	1810	0,094	0,119
Конфіденційна	2	0,095	1086	0,057	0,076
Відкрита	1	0,048	1	0,000	0,024

2. Рівень важливості інформації. Під важливою слід розуміти таку інформацію, втрата або несанкціонований доступ до якої завдають значних збитків установі або повністю зупинять її роботу. Важливість інформації та рівень її важливості запропоновано визначати групою експертів з установи, а кількісне значення отримувати шляхом нормування рівнів важливості за допомогою такого виразу:

$$\alpha_2 = \frac{im_j}{\sum_{j=1}^k im_j}, \quad (4)$$

де  $k$  – кількість рівнів доступу до інформації;

$im_j$  –  $j$ -й рівень важливості інформації.

3. Вид права власності на інформацію. Право власності на інформацію визначається Законом України “Про інформацію”. Відповідно до цього документа є такі види права власності на інформацію: персональна, колективна та державна. Рівень виду права власності на інформацію, яка циркулює в установі та підлягає захисту, пропонуємо визначати групою експертів з установи, а кількісне значення отримувати шляхом нормування рівнів виду права на інформацію за допомогою такого виразу:

$$\alpha_3 = \frac{o_i}{\sum_{i=1}^m o_i}, \quad (5)$$

де  $m$  – кількість рівнів виду доступу до інформації;

$o_i$  –  $i$ -й рівень виду доступу до інформації.

Перевірку працездатності математичної моделі розрахунку цінності інформації проведено на прикладі.

Групою експертів для установи розроблено показники інформації та відповідно до виразів (2)–(5) проведено їх розрахунок, результати якого наведено в табл. 2–3.

Таблиця 2

Показник “Рівень важливості інформації”

Інформація за рівнем важливості	$im_j$	$\alpha_2$
Життєво необхідна	5	0,333
Дуже важлива	4	0,267
Важлива	3	0,200
Корисна	2	0,133
Несуттєва	1	0,067

Таблиця 3

Показник “Рівень виду права власності на інформацію”

Інформація за видом права власності на інформацію	$o_j$	$\alpha_3$
Державна	4	0,4
Колективна (установа)	3	0,3
Колективна (відділ установи)	2	0,2
Персональна	1	0,1

В установі складено групою її експертів перелік тієї інформації, яка потребує захисту. Отримані дані наведено в табл. 4.

## Список інформації

Назва інформації	Рівень обмеження доступу	Остаточний час старіння (дів)	Рівень важливості	Рівень виду права власності
Індивідуальний план роботи начальника установи на 2022 рік	Відкрита	1	Несуттєва	Персональна
План роботи відділу 1 установи на 2022 рік	Конфіденційна	1086	Корисна	Колективна (відділ установи)
План роботи відділу 2 установи на 2022 рік	Конфіденційна	1086	Важлива	Колективна (відділ установи)
План роботи установи на 2022 рік	Для службового користування	1810	Важлива	Колективна (установа)
План розвитку міністерства на 2022 рік	Цілковито таємно	3620	Дуже важлива	Державна
План розвитку держави на 2020–2025 роки	Особливої важливості	10860	Життєво необхідна	Державна
Звіт за результатами діяльності держави за 2021 рік	Таємно	1810	Важлива	Державна
Звіт за результатами діяльності міністерства за 2021 рік	Для службового користування	1810	Важлива	Державна
Звіт за результатами діяльності установи за 2021 рік	Конфіденційна	1086	Корисна	Колективна (установа)
Звіт за результатами діяльності відділу 1 установи за 2021 рік	Конфіденційна	1086	Корисна	Колективна (відділ установи)
Звіт за результатами діяльності відділу 2 установи за 2021 рік	Конфіденційна	1086	Важлива	Колективна (відділ установи)
Звіт за результатами діяльності начальника установи за 2021 рік	Відкрита	1	Несуттєва	Персональна

Використовуючи запропоновану математичну модель розрахунку цінності інформації, отримано кількісні значення цінності інформації та коефіцієнтів, які характеризують вплив показників інформації на її цінність. Результати розрахунків наведено в табл. 5.

## Результати розрахунків

Назва інформації	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	VOI
Індивідуальний план роботи начальника установи на 2022 рік	0,024	0,067	0,1	0,064
План роботи відділу 1 установи на 2022 рік	0,076	0,133	0,2	0,136
План роботи відділу 2 установи на 2022 рік	0,076	0,2	0,2	0,159
План роботи установи на 2022 рік	0,119	0,2	0,3	0,206
План розвитку міністерства на 2022 рік	0,214	0,267	0,4	0,294
План розвитку держави на 2020–2025 роки	0,426	0,333	0,4	0,386
Звіт за результатами діяльності держави за 2021 рік	0,142	0,2	0,4	0,247
Звіт за результатами діяльності міністерства за 2021 рік	0,119	0,2	0,4	0,240
Звіт за результатами діяльності установи за 2021 рік	0,076	0,133	0,3	0,170
Звіт за результатами діяльності відділу 1 установи за 2021 рік	0,076	0,133	0,2	0,136
Звіт за результатами діяльності відділу 2 установи за 2021 рік	0,076	0,2	0,3	0,192
Звіт за результатами діяльності начальника установи за 2021 рік	0,024	0,067	0,1	0,064

Відповідно до отриманих результатів з'ясовано, що цінність інформації зростає залежно від:

рівня обмеження доступу до інформації: чим вищим є рівень обмеження доступу, тим цінніша інформація для установи;

рівня важливості інформації: чим вищим є рівень важливості інформації, тим більшою є цінність інформації;

рівня виду права на інформацію: чим більшою є кількість суб'єктів, які мають право на володіння інформацією, тим ціннішою є інформація.

Усі рівні обмеження доступу до інформації, її важливості та виду права на неї визначаються групою експертів.

**Висновки.** Проведена перевірка адекватності математичної моделі розрахунку цінності інформації установи дозволяє зробити висновки про те, що інформація, яка має найвищий рівень обмеження доступу, найвищий рівень важливості та права на яку належать державі, є найбільш цінною в установі.

Розроблена математична модель розрахунку цінності інформації установи доповнює модель загроз інформації в установі. Саме врахування цінності інформації дозволить вжити додаткових заходів для вдосконалення комплексної системи захисту інформації в автоматизованих системах установи.

Математична модель розрахунку цінності інформації установи може застосовуватися як на етапі проектування комплексної системи захисту інформації в автоматизованих системах установи, так і під час експлуатації з метою зниження рівня потенційних загроз.

Подальші наукові дослідження будуть спрямовані на розроблення методичних рекомендацій щодо застосування математичної моделі розрахунку цінності інформації установи для розробки моделі загроз.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Термінологія в галузі захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 1.1-003-99 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 28.04.1999 № 22. URL: [http://dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?showHidden=1&art\\_id=102106&cat\\_id=46556&ctime=1344502446343](http://dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?showHidden=1&art_id=102106&cat_id=46556&ctime=1344502446343) (дата звернення: 10.02.2022).
2. Загальні положення щодо захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 1.1-002-99 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 28.04.1999 № 22. URL: <http://dsszzi.gov.ua/dsszzi/doccatalog/document?id=106340> (дата звернення: 10.02.2022).
3. Вимоги із захисту службової інформації від несанкціонованого доступу під час оброблення в автоматизованих системах класу 2. НД ТЗІ 2.5-008-2002 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 13.12.2002 № 84. URL: <https://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/doccatalog/document/id=106343> (дата звернення: 10.02.2022).
4. Класифікація автоматизованих систем і стандартні функціональні профілі захищеності оброблюваної інформації від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 2.5-005-99 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 28.04.1999 № 22. URL: [http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/articleshowHidden=1&art\\_id=101870&cat\\_id=89734&ctime=1344501089407](http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/articleshowHidden=1&art_id=101870&cat_id=89734&ctime=1344501089407) (дата звернення: 10.02.2022).
5. Критерії захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 2.5-004-99 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 28.04.1999 № 22. URL: <https://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/doccatalog/document/id=106342> (дата звернення: 10.02.2022).
6. Порядок проведення робіт із створення комплексної системи захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційній системі. НД ТЗІ 3.7-003-05 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 08.11.2005 № 125. URL: <https://tzi.com.ua/downloads/3.7-003-2005.pdf> (дата звернення: 07.02.2022).
7. Типове положення про службу захисту інформації в автоматизованій системі. НД ТЗІ 1.4-001-2000 : наказ Департаменту спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України від 04.12.2000 № 53. URL: <https://tzi.com.ua/downloads/1.4-001-2000.pdf> (дата звернення: 08.02.2022).
8. Мороз Б., Молотков О., Ульяновська Ю. Методи визначення цінності інформації для організації її захисту // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. 2001. Вип. 2. С. 46–53.

9. Заяць В. М., Рибицька О. М., Заяць М. М. Підхід до оцінювання цінності та кількості інформації в системах масового обслуговування на основі теорії розпізнавання образів та нечітких множин // Кібернетика і системний аналіз. 2019. № 4 (55). С. 133–144. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00172-1>
10. Заяць В. М., Заяць М. М. Образний підхід до кількісної оцінки цінності інформації // Доповіді Національної академії наук України. 2018. № 6. С. 32–39. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.032>
11. Гулак Г. М. Методологія захисту інформації. Аспекти кібербезпеки : підручник. Київ : Вид-во НА СБ України, 2020. 256 с.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2022.

## REFERENCES

1. Terminolohiia v haluzi zakhystu informatsii v komp'uternykh systemakh vid nesanktsionovanoho dostupu. ND TZI 1.1-003-99 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 28.04.1999 № 22 [Terminology in the field of information protection in computer systems against unauthorized access. ND TZI 1.1-003-99: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated April 28, 1999 No. 22]. Retrieved from [http://dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?showHidden-1&art\\_id-102106&cat\\_id=46556&ctime=1344502446343](http://dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?showHidden-1&art_id-102106&cat_id=46556&ctime=1344502446343) [in Ukrainian].
2. Zahalni polozhennia shchodo zakhystu informatsii v komp'uternykh systemakh vid nesanktsionovanoho dostupu. ND TZI 1.1-002-99 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 28.04.1999 № 22 [General provisions on the protection of information in computer systems against unauthorized access. ND TZI 1.1-002-99: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated April 28, 1999 No. 22]. Retrieved from <http://dsszzi.gov.ua/dsszzi/doccatalog/document?id=106340> [in Ukrainian].
3. Vymohy iz zakhystu sluzhbovoi informatsii vid nesanktsionovanoho dostupu pid chas obroblennia v avtomatyzovanykh systemakh klasu 2. ND TZI 2.5-008-2002 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 13.12.2002 № 84 [Requirements for the protection of official information from unauthorized access during processing in automated class 2 systems. ND TZI 2.5-008-2002: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated December 13, 2002 No. 84]. Retrieved from <https://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/doccatalog/document/id=106343> [in Ukrainian].
4. Klasyfikatsiia avtomatyzovanykh system i standartni funktsionalni profili zakhyshchenosti obroblivanoi informatsii vid nesanktsionovanoho dostupu. ND TZI 2.5-005-99 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 28.04.1999 № 22 [Classification of automated systems and standard functional profiles of protection of processed information from unauthorized access. ND TZI

- 2.5-005-99: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated April 28, 1999 No. 22]. Retrieved from [http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/articleshowHidden=1&art\\_id=101870&cat\\_id=89734&ctime=1344501089407](http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/articleshowHidden=1&art_id=101870&cat_id=89734&ctime=1344501089407) [in Ukrainian].
5. Kryterii zakhyshchenosti informatsii v komp'uternykh systemakh vid nesanktsionovanoho dostupu. ND TZI 2.5-004-99 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 28.04.1999 № 22 [Information security criteria in computer systems against unauthorized access. ND TZI 2.5-004-99: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated April 28, 1999 No. 22]. Retrieved from <https://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/doccatalog/document/id=106342> [in Ukrainian].
6. Poriadok provedennia robot iz stvorennia kompleksnoi systemy zakhystu informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinii systemi. ND TZI 3.7-003-05 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 08.11.2005 № 125 [The procedure for the creation of a comprehensive information protection system in the information and telecommunications system. ND TZI 3.7-003-05: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated November 8, 2005 No. 125]. Retrieved from <https://tzi.com.ua/downloads/3.7-003-2005.pdf> [in Ukrainian].
7. Typove polozhennia pro sluzhbu zakhystu informatsii v avtomatyzovani systemi. ND TZI 1.4-001-2000 : nakaz Departamentu spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy vid 04.12.2000 № 53 [A typical provision on the information protection service in an automated system. ND TZI 1.4-001-2000: order of the Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine dated December 4, 2000 No. 53]. Retrieved from <https://tzi.com.ua/downloads/1.4-001-2000.pdf> [in Ukrainian].
8. Moroz, B., Molotkov, O., & Ulianovska, Yu. (2001). Metody vyznachennia tsinnosti informatsii dlia orhanizatsii yii zakhystu [An approach to evaluating the value and amount of information in mass service systems based on the theory of pattern recognition and fuzzy sets]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennia systemy zakhystu informatsii v Ukraini [Cybernetics and system analysis]*, 2, 46–53 [in Ukrainian].
9. Zaiats, V. M., Rybyska, O. M., & Zaiats, M. M. (2019). Pidkhid do otsiniuvannia tsinnosti ta kilkosti informatsii v systemakh masovoho obsluhovuvannia na osnovi teorii rozpoznavannia obraziv ta nechitkykh mnozhyn [An approach to evaluating the value and amount of information in mass service systems based on the theory of pattern recognition and fuzzy sets]. *Kibernetyka i systemnyi analiz [Cybernetics and system analysis]*, 4 (55), 133–144. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00172-1> [in Ukrainian].
10. Zaiats, V. M., & Zaiats, M. M. (2018). Obraznyi pidkhid do kilkisnoi otsinky tsinnosti informatsii [Figurative approach to quantitative assessment of the value of information]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 6, 32–39. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.032> [in Ukrainian].

11. Hulak, H. M. (2020). *Metodolohiia zakhystu informatsii. Aspekty kiberbezpeky [Information protection methodology. Aspects of cyber security]*. Kyiv [in Ukrainian].

**O. S. Bojchenko, D. S. Kosterev, I. Yu. Makovskyi, O. M. Hryshchuk**

**MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION THE VALUE OF INFORMATION OF THE INSTITUTION**

*The article is devoted to solving a relevant scientific and practical problem - the development of a mathematical model for calculating the value of information of the institution. The following concepts are interpreted: the value of information, the level of importance of information, the time of final aging of information and the level of ownership of information used in research on the object of information protection. The indicators by which it is proposed to determine the value of information are considered in detail and its dependence on such indicators is shown. It is proposed to calculate the value of information as the average value of the sum of the relevant coefficients. Each of the selected coefficients is calculated using the ranking method. The importance of the relevant information indicator is determined in accordance with the requirements of the guidance documents on the organization of information security or a specially created group of experts. It is proposed to use the following coefficients: the coefficient of influence of the level of access to information, the coefficient of influence of the time of final aging of information, the coefficient of influence of information importance and the coefficient of influence of the right to information. The adequacy of the mathematical model for calculating the value of information of the institution was checked. It is established that the information that has the highest level of restriction of access, the highest level of importance and the right to information belongs to the state, has the greatest value for the institution. An example is given in which a list of information that needs protection in the institution is compiled and the value of information from this list is calculated. The mathematical model of calculating the value of the institution's information allows you to justify the need to take additional measures to improve the comprehensive system of information protection in the institution's automated systems and to better approach the issue of forming a model of information threats in information and telecommunication systems.*

**Keywords:** *value of information; ownership of information; time of final aging of information; level of importance of information.*



О. О. Костиря, А. А. Гризо, О. М. Додух, І. М. Невмержицький, О. А. Нагорнюк,  
В. М. Міняйло

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БАГАТОДІАПАЗОННОГО ІМІТАТОРА ПОСТАНОВНИКА АКТИВНИХ ШУМОВИХ ПЕРЕШКОД

*У статті висвітлено інформацію щодо результатів експериментальних досліджень багатодіапазонного програмно-апаратного комплексу імітації дії постановника активних шумових перешкод, який було створено для тренування операторів радіолокаційних станцій радіотехнічних військ.*

*Одним із важливих елементів фахової підготовки обслуг радіолокаційних станцій радіотехнічних військ протиповітряної оборони є їх навченість роботі в складних цільових та заводових умовах. Наявні тренажери з підготовки операторів не відповідають у повній мірі вимогам із якості навчання, оскільки формують лише вторинні позначки пеленга на постановник перешкод та не відтворюють ситуацію погіршення умов виявлення цілей унаслідок одночасної дії активної та пасивної перешкод, а також вплив автокомпенсатора перешкод на якість роботи радіолокатора, як це відбувається в реальній обстановці.*

*Запропонований пристрій імітації впливу активних перешкод побудовано за модульним принципом та реалізовано за допомогою технології програмновизначеного радіо, що дозволяє оперативно змінювати як вид перешкоди, так і її параметри. Підсилювачі потужності та антенні системи виконані для роботи в діапазонах 140–190 МГц, 470–900 МГц та 2500–3500 МГц, а для експериментальних досліджень залучалися радіолокаційні станції метрового, дециметрового та сантиметрового діапазонів хвиль. Обґрунтовано також методика застосування імітатора. Проведені дослідження показали, що для радіолокаційних станцій, у яких кутomisні промені діаграми спрямованості мають різні робочі частоти, є додаткова можливість імітації дії постановника активних перешкод за рахунок зміни частоти перешкоди, у разі роботи комплексу безпосередньо поблизу об'єкта подавлення, де діаграма спрямованості антени радіолокаційної станції ще не сформована. Обґрунтовано методика застосування комплексу як для навчальних занять, так і в ході тактичних навчань підрозділу радіотехнічних військ для імітації дії постановника перешкод повітряного базування або передавача перешкод, що закидається.*

**Ключові слова:** *активна шумова перешкода; імітація; програмно-апаратний комплекс; радіолокаційна станція; програмновизначене радіо.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Досвід застосування підрозділів радіотехнічних військ (РТВ) під час агресії російської федерації проти України свідчить про нагальну необхідність суттєвого покращення якості підготовки розрахунків радіолокаційних станцій (РЛС) до бойової роботи в складних сигнально-перешкодових

умовах [1–3]. Це спричинено широким застосуванням малорозмірних засобів повітряного нападу (ЗПН), особливо безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також одночасним впливом активних та пасивних перешкод, що зумовлює раптовість і прихованість дій повітряного противника [4–6]. Оператори мають бути готові до дій у такій обстановці, що потребує отримання та закріплення практичних навичок як із виявлення самого факту постановки перешкоди, так і з визначення її виду, напрямку, з якого вона діє, щоб оптимізувати режими огляду простору та обрати оптимальні режими роботи систем захисту від перешкод й оцінити їх ефективність.

Наземні оглядові РЛС РТВ, які знаходяться на типових позиціях, зазвичай ведуть розвідку повітряного простору за умов дії пасивних перешкод, що мають переважно природний характер. Вони, зазвичай, викликані відбиттям від підстильної поверхні та гідрометеорів.

Активні шумові перешкоди (АШП), як правило, мають навмисний характер, їх застосовують для прикриття дій ЗПН [7–9], що робить неможливим проведення тренувань. Власні засоби радіоелектронного подавлення, які перебувають на озброєнні Збройних Сил (ЗС) України, не можуть використовуватися для тренування операторів за необхідності забезпечення заходів протидії іноземним технічним розвідкам, а також виконання умов електромагнітної сумісності з іншими працюючими радіоелектронними засобами. Наявні тренажерні системи підготовки операторів забезпечують формування лише вторинних позначок пеленга на джерело перешкодового сигналу та не можуть відображати більш «тонкі» особливості роботи апаратури, а саме ефект погіршення якості компенсації перешкод у разі, коли одночасно діють активні та пасивні перешкоди. Також неможливо відтворити вплив роботи автокомпенсатора перешкод на якість виявлення цілей.

Окремий клас постановників активних перешкод (ПАП), який має свої особливості, – постановники перешкод, що закидаються (ППЗ). Конструктивне виконання ППЗ визначає тактику їх застосування в ближній зоні діаграми спрямованості антени (ДСА), де вона ще не сформувалася, що робить неможливим визначення пеленга на ПАП та ефективне формування провалів у зоні виявлення в напрямку на ПАП, а тому ефективність роботи автокомпенсатора АШП падає. Оператор має бути підготовленим та мати практичні навички роботи з виявлення факту дії ППЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика застосування імітаторів ПАП для проведення тренувань операторів та полігонних випробувань РЛС широко висвітлюється в літературі, а також розробляються методики використання таких пристроїв. Щодо загальних тенденцій, основних понять та вимог до сучасних комплексів імітації постановників перешкод відносно РЛС РТВ, то слід звернути увагу на [10]. В [11, 12] запропоновано варіант методики визначення основних параметрів наземних передавачів перешкод малої потужності, які б здійснювали на роботу РЛС такий самий вплив, як і реальні постановники АШП. Загальні принципи побудови програмно-апаратного імітатора первинних радіолокаційних сигналів диспетчерського радіолокатора розглянуто в [13]. Запропонований пристрій може бути використано для відтворення моделей вхідних сигналів радіолокатора, а також для тренування операторів. У роботі [14] розглянуто особливості проведення полігонних випробувань за допомогою імітаторів ПАП, проаналізовано вимоги до визначення їх місця розташування. Залежно від відстані

постановника перешкод до РЛС розглянуто такі моделі впливу: ПАП знаходиться в дальній зоні виявлення, тому перевідбиттям сигналу від підстильної поверхні можна знехтувати; у другій моделі враховується спотворення ДСА за рахунок перевідбиття електромагнітної енергії; третя модель відображає особливості розміщення імітатора ПАП у ближній зоні виявлення, оскільки дозволяє враховувати сферичність фазового фронту радіохвиль. Зазначено, що коли імітатор ПАП знаходиться в ближній зоні, то кутовий розмір позначки пеленга на екрані РЛС збільшується майже в півтора раза та знижується потенційна якість роботи системи перешкодозахисту. Тобто із ближньої зони імітатор ПАП впливає сильніше, ніж еквівалентний за потужністю ПАП зі стандартної відстані 200 км.

Аналіз літератури показує, що автори переважно зосереджувалися на визначенні тактико-технічних характеристик РЛС в умовах дії активних перешкод, для чого і розроблялися методики використання імітаторів ПАП та їх принципи побудови. Оскільки тренування операторів передбачає лише відтворення на екрані робочого місця, подібного саме до реального відображення прояву перешкоди, то іншими вимогами до імітаторів можна знехтувати, а це дозволяє суттєво спростити варіант побудови пристрою імітації ПАП.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є розробка методики застосування та висвітлення результатів експериментальних випробовувань програмно-апаратного комплексу імітації дії постановника радіоперешкод, який забезпечує імітацію впливу АШП в усіх частотних діапазонах, що використовуються оглядовими РЛС РТВ, та дозволяє здійснювати тренування операторів в умовах, максимально наближених до реальних.

### **Виклад основного матеріалу**

#### **Побудова та принцип роботи програмно-апаратного комплексу імітації ПАП**

Найпоширенішим способом застосування постановників АШП повітряного базування під час прориву системи протиповітряної оборони є колективне прикриття, коли бортові комплекси радіоелектронної боротьби перебувають поза межами зон ураження вогневыми засобами противника [1, 3, 9]. У такому разі ПАП баражують на висоті 1,5–3 км на відстані близько 100–150 км від РЛС. За таких умов кутомісне положення ПАП відносно РЛС, яка подавляється, становить близько  $1^{\circ}$ – $2^{\circ}$ , тобто перешкода діє в першому промені ДСА. Така тактика застосування ПАП є найбільш доцільною для противника, оскільки дозволяє здійснити прикриття переважної більшості засобів повітряного нападу (ударні літаки, вертольоти, БпЛА різного призначення), які і мають виявлятися саме в цьому промені. У свою чергу, боєздатність підрозділу РТВ значною мірою залежить від спроможності операторів РЛС вести повітряну розвідку саме у такій складній цільовій та перешкодовій обстановці. Тому необхідно проводити систематичні тренування із супроводу повітряних цілей у складних перешкодових умовах, а для цього замість реальних польотів ПАП доцільно використовувати малопотужні імітаційні пристрої, встановлені на позиції РЛС.

У ході досліджень розроблено принцип побудови та створено діючий макет такого імітатора ПАП. На рис. 1 наведено структурну схему пристрою.

Імітатор ПАП побудовано за відомою схемою «малопотужний збуджувач – підсилювач потужності». Як джерело сигналу використовується пристрій HackRF ONE, який керується персональним комп'ютером. Цей пристрій побудовано за технологією

SDR (англ. Software-defined radio), згідно з термінологією, запропованою в [15], трактується як програмновизначене радіо. Програмновизначене радіо – це методи побудови радіосистем, якими передбачається реалізація функцій фізичного рівня за рахунок програмного забезпечення. Тобто сутність технології SDR полягає в тому, що базові параметри приймально-передавальних пристроїв та алгоритми обробки сигналів визначаються не апаратною конфігурацією, а використаним програмним забезпеченням.

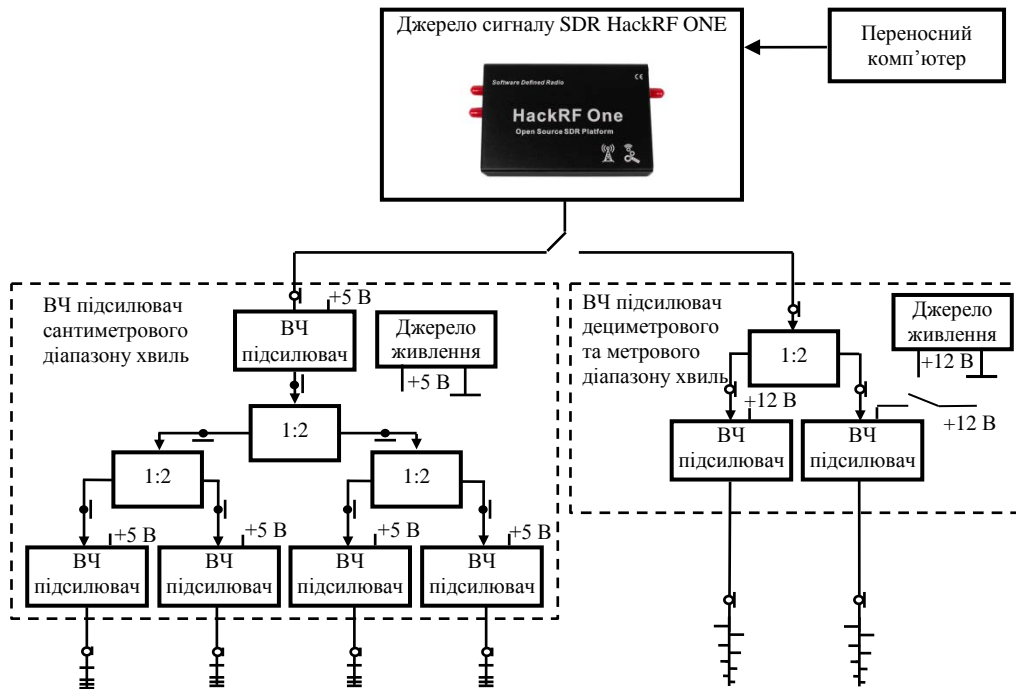


Рис. 1. Структурна схема імітатора ПАП

Програмне забезпечення для пристрою імітації дії ПАП створено за допомогою вільно розповсюджаного програмного продукту GNU Radio Companion (GRC). GNU Radio – це відкритий і безкоштовний пакет програм, призначений для цифрової обробки сигналів у наукових, освітніх або комерційних цілях. Система складається з великої кількості готових блоків. До GNU Radio входить також візуальний редактор, який дозволяє з'єднувати блоки в готовий «пристрій», взагалі не використовуючи мову програмування [16, 17].

Модульна побудова з використанням COTS-технології забезпечує простоту, високу швидкість розробки та низьку вартість технічних рішень, що застосовуються. Використання SDR-технології в побудові збуджувача сигналу дозволяє генерувати сигнали різних видів у діапазоні 1–6000 МГц, що охоплює всі зразки РЛС РТВ.

Функціонально імітатор складається з програмованого джерела радіосигналів, керування яким здійснюється за допомогою переносного комп'ютера, та двох схожих за принципом побудови блоків височастотного (ВЧ) підсилення з антенними системами.

Сформований сигнал із виходу HackRF ONE подається на ВЧ підсилювач сантиметрового або дециметрового (метрового) діапазону хвиль. ВЧ підсилювач метрового та дециметрового діапазону, зовнішній вигляд якого та використану елементну базу наведено на рис. 2а, забезпечує роботу в діапазоні частот 1–2000 МГц. Однак під час експерименту його вихідні сигнали обмежувалися діапазонами 140–190 МГц та 470–900 МГц, що визначалося

характеристиками випромінювальних антен. Цей підсилювач є двоканальним з просторовим складанням потужності, однак його можна використовувати й в одноканальному режимі, вимикаючи живлення одного з підсилювачів.

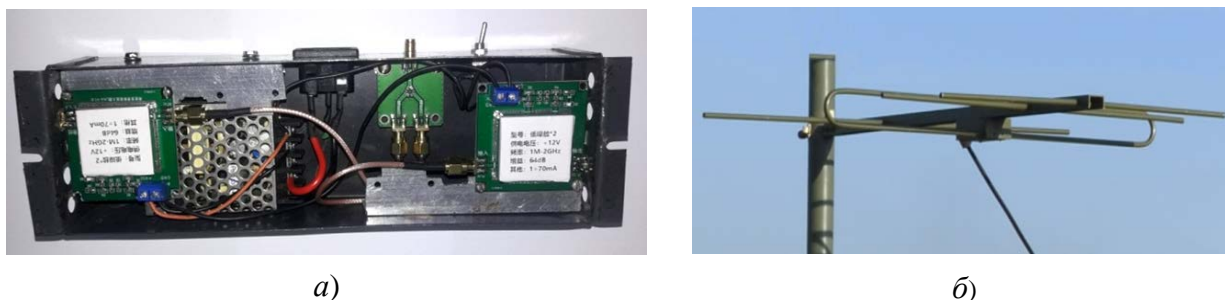


Рис. 2. Зовнішній вигляд, елементна база підсилювача дециметрового і метрового діапазонів хвиль (а) та антена метрового діапазону хвиль зі щоглою (б)

Для роботи імітатора ПАП у метровому діапазоні хвиль використано антени типу «хвильовий канал» зі складу компенсаційного каналу РЛС П-18 «Малахіт» (рис. 2б).

Антенна система дециметрового діапазону є двоелементною антенною решіткою. Як елемент системи застосовано широкосмугову логоперіодичну антену загального користування для приймання 21–69 телевізійних каналів. За коефіцієнтом підсилення така антена еквівалентна три-чотириелементній антені типу «хвильовий канал», яка використовується в метровому каналі. Підключення антен до ВЧ підсилювачів здійснюється коаксіальними лініями однакової електричної довжини.

Кутомісні канали виявлення РЛС 19Ж6 (35Д6), П-37 працюють на різних робочих частотах, а тому шляхом зміни середньої частоти вихідного сигналу імітатора ПАП можна забезпечити наявність АШП окремо в кожному з кутомісних променів, коли імітаційний комплекс діє «з поверхні» поруч з РЛС, також у подальшому можна використовувати будь-які радіосигнали, змінюючи програмне забезпечення за незмінної побудови, що надає розробленому пристрою гнучкості та адаптивності.

ВЧ підсилювач сантиметрового діапазону має чотириканальну побудову із просторовим складанням потужності. Його виконано із застосуванням смужкової технології. Зовнішній вигляд та побудову підсилювача сантиметрового діапазону з антенною системою 10 см діапазону наведено на рис. 3. Сигнал спочатку подається на вхідний ВЧ підсилювач, за допомогою якого забезпечується рівень потужності, достатній для подальшого поділу на чотири канали. Поділ потужності здійснюється через послідовне включення смужкових ділянок на два. ВЧ підсилювальні модулі TQP3M9009 включені безпосередньо в смужкові лінії та мають жорстке кріплення, корпус підсилювача – це силова складова антенної системи, що є чотириелементною антенною решіткою.

Створений багатодіапазонний програмно-апаратний імітаційний комплекс забезпечує отримання операторам РЛС РТВ практичних навичок бойової роботи за умов реального впливу АШП. Комплекс може бути використано під час навчальних занять, а також у ході тактичних навчань підрозділу РТВ для імітації дії постановника АШП повітряного базування або впливу ППЗ. У наведеному варіанті побудови комплексу застосовані

підсилювальні елементи можуть імітувати вплив ПАП у діапазоні 1–4000 МГц. Конкретний частотний діапазон обирається використанням відповідних антенних систем.

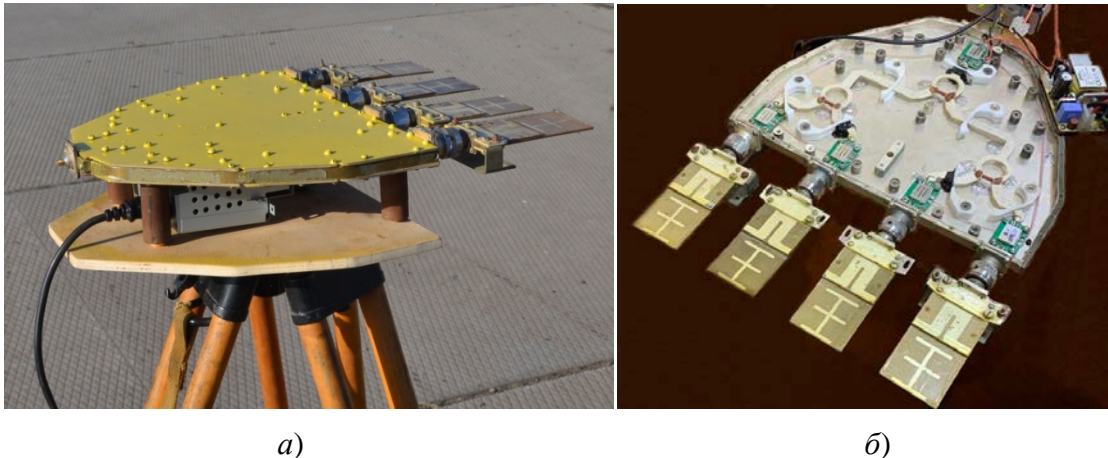


Рис. 3. Зовнішній вигляд (а), побудова (б) підсилювача сантиметрового діапазону з антенною системою

### Обґрунтування методики використання імітатора ПАП

Методика застосування імітатора ПАП полягає у визначенні відстані та положення пристрою відносно об'єкта подавлення, що і було перевірено під час експериментальних досліджень на позиції навчально-тренувального комплексу Харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.

Для знаходження потрібного віддалення імітатора від РЛС, що подавляється, скористаємося виразом для визначення дальності дії ПАП [18].

Дальність подавлення залежить від енергетичних потенціалів, форм ДСА РЛС і ПАП та їх взаємного просторового положення. Максимальне віддалення, на якому може знаходитися ПАП для забезпечення потрібного значення коефіцієнта подавлення з потужності  $K_{\Pi}$  (у межах відстані об'єкт прикриття – РЛС, яка подавляється), знаходимо за формулою [18]

$$D_{\text{ПАП}} \leq D_{\text{РЛС}}^2 \sqrt{\frac{4\pi P_{\text{ПАП}} G_{\text{ПАП}} \Delta f_{\text{РЛС}} \gamma_n}{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}} \Delta f_{\text{ПАП}} K_{\Pi} \sigma_{\text{ч}}}} \quad (1)$$

за умови, що  $\Delta f_{\text{ПАП}} > \Delta f_{\text{РЛС}}$ ,

де  $D_{\text{РЛС}}$  – дальність виявлення цілі РЛС, м;

$P_{\text{ПАП}}$ ,  $P_{\text{РЛС}}$  – потужності сигналу ПАП та зондувальних сигналів РЛС відповідно, Вт;

$G_{\text{ПАП}}$ ,  $G_{\text{РЛС}}$  – коефіцієнт підсилення антен ПАП та РЛС відповідно;

$\Delta f_{\text{РЛС}}$  – ширина смуги пропускання лінійної частини радіоприймача РЛС, Гц;

$\gamma_n$  – коефіцієнт поляризаційної недосконалості перешкоди, що враховує відмінність поляризації сигналу та перешкоди ( $0 \leq \gamma_n \leq 1$ );

$\Delta f_{\text{ПАП}}$  – ширина спектра перешкоди, що випромінюється ПАП, Гц;

$\sigma_y$  – ефективна поверхня розсіювання цілі, що прикривається, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт подавлення з потужності  $K_{\Pi}$  – це мінімально необхідне співвідношення потужності перешкоди  $P_n$  та корисного сигналу  $P_c$  на вході лінійної частини радіоприймача, за якої досягається необхідний ступінь подавлення РЛС, визначається за формулою [18]

$$K_{\Pi} = (P_n / P_c)_{\min} = Lq^2 / 2,$$

де  $L$  – коефіцієнт втрат корисного сигналу в приймальному тракті;

$q^2 = 2E / N_0$  – параметр виявлення;

$E$  – енергія корисного сигналу;

$N_0$  – спектральна щільність потужності власних шумів приймального пристрою РЛС.

Для виконання необхідних розрахунків за виразом (1) скористаємося паспортними характеристиками РЛС, які залучалися до проведення експериментальних досліджень, а саме метрового діапазону хвиль П-18 «Малахіт», дециметрового діапазону П-19МА та сантиметрового діапазону 19Ж6.

Визначимо параметри імітатора ПАП.

Для підсилювача дециметрового та метрового діапазонів з відповідними антенними системами (рис. 2а)  $G_{\text{ПАП}} \approx 1,4$ , сумарна потужність  $P_{\text{ПАП}}$  становить близько 250 мВт, ширина спектра вихідного сигналу  $\Delta f_{\text{ПАП}} = 2$  МГц. Розрахунки за формулою (1) показують, що для подавлення РЛС П-18 «Малахіт» необхідно розміщувати імітатор на відстані до 400 м від антени. Варіювання віддаленням імітатора разом із двоступінчатою зміною потужності вихідного сигналу забезпечують зміну інтенсивності АШП у широких межах та дають змогу створювати різновиди заводової обстановки.

Для каналу імітатора ПАП сантиметрового діапазону (рис. 3)  $G_{\text{ПАП}} \approx 4$ , сумарна потужність дорівнює приблизно 500 мВт, ширина спектра перешкоди 2 МГц. З підстановки до формули (1) випливає, що для імітації дії ПАП пристрій має бути розміщено на відстані до 200 м від антени.

Слід зауважити, що в разі розміщення імітатора ПАП на малих відстанях від антен РЛС провали ДСА розпливаються та згладжуються, сектор ефективного подавлення значно розширюється відносно тієї ширини, що була б за дії стандартного ПАП. Крім того, реальний ПАП може бути розташованим у напрямку інтерференційного провалу, що призведе до зниження рівня перешкоди на 10–13 дБ, а тому прояв імітованої перешкоди буде більш інтенсивним [11].

### Результати експериментальних досліджень макета імітатора ПАП

Для перевірки працездатності розробленого макета імітатора ПАП та методики його застосування було проведено низку натурних експериментів із залученням РЛС різних частотних діапазонів.

Щодо можливості використання імітатора метрового та дециметрового діапазонів хвиль фактично йдеться про дослідження його впливу на працездатність РЛС типів П-18 (5Н84А), П-19 та їх подальших модернізацій, а саме П-18 «Малахіт», П-18МА, 5Н84АМА,

П-19МА. Ці РЛС, відповідно до загальної класифікації, є двокоординатними, тому під час впливу ПАП з різних кутомісних напрямів вигляд їх екранів кругового огляду буде однаковим, відмінності визначатимуть тільки енергетичні співвідношення та особливості технічної реалізації самих РЛС. Експериментальна перевірка імітатора ПАП у метровому діапазоні хвиль проводилася із використанням РЛС П-18 «Малахит» (рис. 4а), а в дециметровому – РЛС П-19МА (рис. 5а).

На рис. 4 демонструється вплив імітатора ПАП, який діє в ближній зоні, на роботу РЛС П-18 «Малахит». Рис. 4б відображає екран робочого місця оператора РЛС, коли імітатор ПАП не працює. На екрані бачимо лише відбиття від місцевих предметів. На рис. 4в наведено фото монітора в умовах дії АШП, унаслідок чого спостерігається засвічення практично всієї зони виявлення, що можна пояснити малою відстанню імітатора від антени РЛС, а тому відбувається суттєве збільшення ефективності подавлення порівняно з дією стандартного ПАП, тобто сектор дії АШП додатково розширився на 70–150%. Рис. 4в також свідчить про те, що провали у ДСА згладжуються та розпливаються, це й призводить до наявного ефекту. Така ж ситуація реально може спостерігатися під час впливу ПАП великої потужності або ж у разі розташування ППЗ поблизу РЛС.

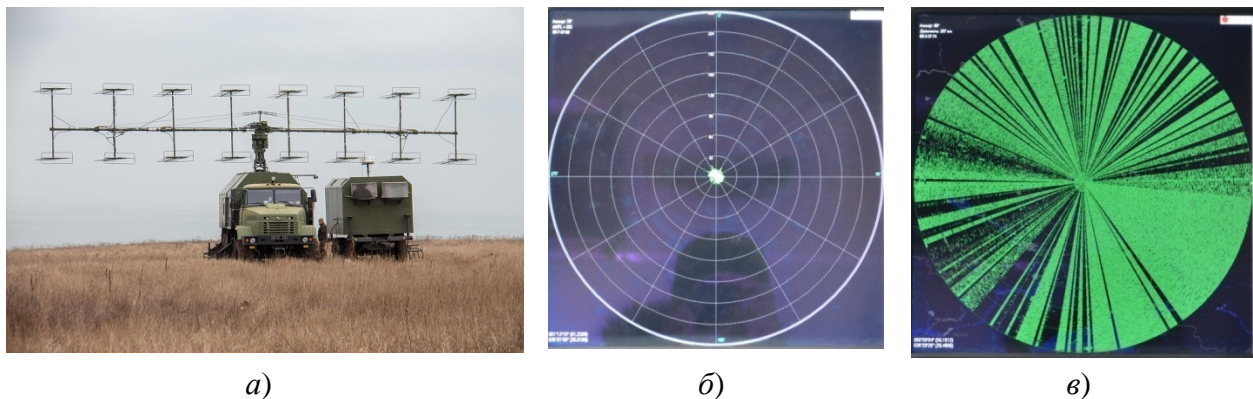


Рис. 4. РЛС метрового діапазону хвиль П-18 «Малахит» (а), фото екрана робочого місця оператора без перешкод (б) та за наявності потужної АШП (в)

Для РЛС типу П-18, П-18МА, 5Н84А, 5Н84АМА результат буде схожим.

На рис. 5б, 5в наведено фото екрана робочого місця оператора РЛС П-19МА відповідно за відсутності АШП та за її наявності. На екрані монітора спостерігається «шумова доріжка» – це колоподібна лінія на змінній дальності, яка відображає загальну перешкодову обстановку. Вона показує оператору інтегральний рівень шумових перешкод та як змінюється зона виявлення РЛС у відповідному напрямку залежно від цього рівня.

За наявності перешкоди «шумова доріжка» суттєво викривляється в сторону зменшення зони виявлення та частково спотворюється в цілому, що вірогідно спричинено перевідбиттям сигналу перешкоди від місцевих предметів. Основна АШП діє з напрямку  $160^\circ$  (рис. 5в), унаслідок чого значна частина «шумової доріжки» зазнала спотворення порівняно із ситуацією, наведеною на рис. 5б.

Для дослідження впливу імітатора ПАП на РЛС 19Ж6 (рис. 6а) його було розміщено в ближній зоні антени та за допомогою HackRF ONE здійснювалося послідовне формування АШП для кутомісних каналів РЛС.



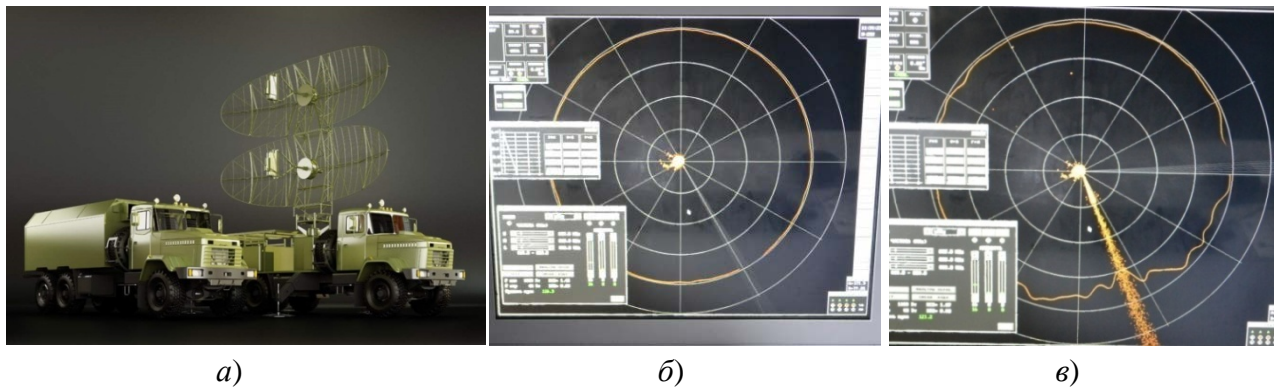


Рис. 5. РЛС дециметрового діапазону хвиль П-19МА (а), фото екрана робочого місця оператора без перешкод (б) та за наявності активної перешкоди з напрямку 160° (в)

На рис. 6б для порівняння з наступними наведено фото екрана робочого місця оператора РЛС 19Ж6 за відсутності перешкод.

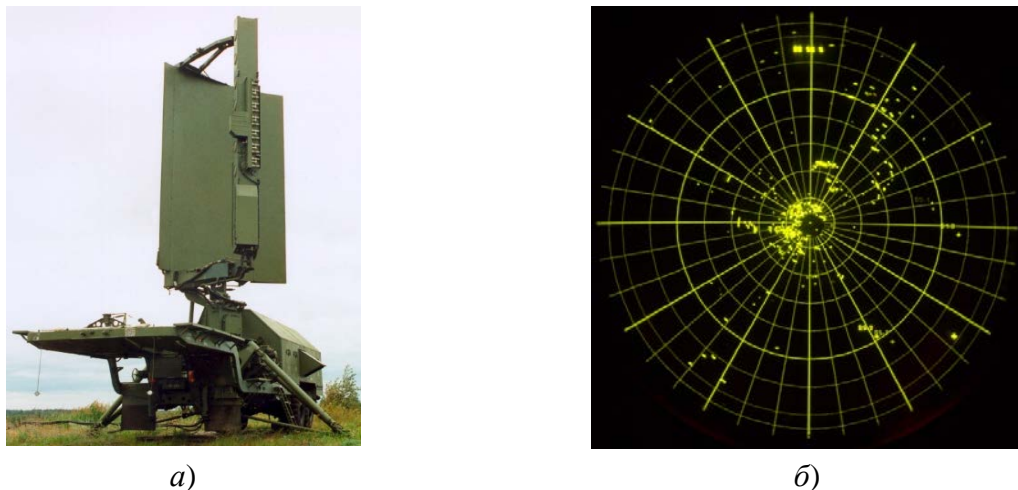
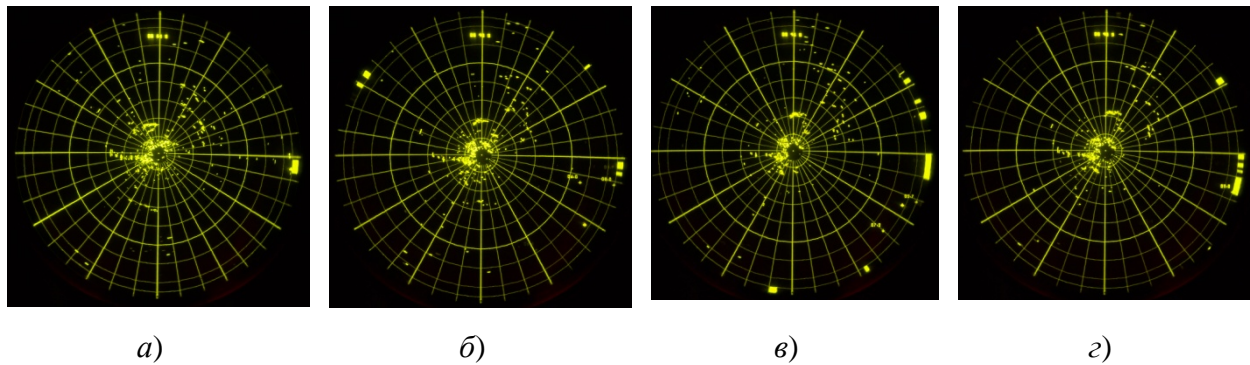


Рис. 6. РЛС сантиметрового діапазону хвиль 19Ж6 (а) та фото екрана робочого місця оператора без перешкод (б)

Фото екрана робочого місця оператора РЛС під час формування АШП на чотирьох різних частотах наведено на рис. 7. Позначки пеленга формуються апаратурою РЛС поза робочою ділянкою дистанції виявлення на тих азимутальних напрямках, з яких діє АШП. Напрямуку на імітатор ПАП відповідає пеленг за азимутом 95°, інші пеленги спричинені перевідбиттями сигналів перешкоди від розташованих поблизу РЛС споруд.

Щодо методики використання розробленого імітатора для підготовки операторів отримані результати можна інтерпретувати таким чином. Спочатку розглянемо ситуацію, яку зображено на фото індикатора кругового огляду рис. 7а. Вона відповідає умовам, коли під час роботи РЛС 19Ж6 застосовується ПАП типу Мі-8ППА, який баражує на висоті 5 км у зоні розміром 50–100 км на відстані від РЛС 100–150 км. Борт обладнано станцією перешкод СПС-63, яка випромінює АШП з довжиною хвилі  $\lambda = 10$  см та спектральною щільністю потужності перешкоди  $P = 50 \dots 250$  Вт/МГц. У разі застосування такого способу постановки АШП кутове положення і відстань ПАП відносно РЛС змінюються в незначних межах, а тому постановник перешкод постійно перебуває в першому кутомісному промені.



*Рис. 7. Фото екрана робочого місця оператора РЛС 19Ж6 під час роботи імітатора ПАП на чотирьох різних частотах кутомісних променів*

Інша ситуація спостерігається, коли для постановки перешкод використовуються середні за розміром БпЛА тактичного рівня типу «Орлан-10», які діють на висотах до 3 км на відстані 50–70 км від РЛС. За таких обставин перешкода може потрапляти в перший, другий та третій кутомісні промені та при незмінній висоті польоту за умов, наприклад, наближення до РЛС з дальності 70 км до 50 км, пеленг буде спостерігатися спочатку в першому – другому променях з переміщенням до другого – третього (рис. 7а, 7б, 7в).

Для інших РЛС, у яких зона виявлення також створюється за допомогою куточастотних каналів, – це П-37 та 35Д6, у разі впливу імітатора ПАП спостерігатимуться схожі результати.

Перешкоди великої потужності випромінюються спеціалізованими ПАП, як правило, повітряного базування, а малогабаритні ПАП типу ППЗ використовують для формування АШП з невеликою потужністю. Створений імітатор ПАП дозволяє в широких межах регулювати потужність перешкоди, змінюючи відстань від РЛС та потужність вихідного сигналу імітатора. Крім того, можна оперативно змінювати параметри випромінюваних перешкод і таким чином відтворювати необхідну ситуацію щодо застосування АШП з метою покращення якості підготовки бойових обслуг радіолокаційних станцій РТВ ППО.

**Висновки.** Результати експериментальних досліджень багатодіапазонного програмно-апаратного комплексу імітації дії ПАП показали доцільність його використання для підготовки бойових розрахунків РЛС, які перебувають на озброєнні РТВ Повітряних Сил Збройних Сил України. Комплекс забезпечує можливість проведення тренувань операторів радіолокаційних засобів в умовах, максимально наближених до реальних, що сприяє більш досконалому опануванню військової техніки. Дослідження проводилися для частотних діапазонів 140–190 МГц, 470–900 МГц та 2500–3500 МГц, що охоплює наявну номенклатуру РЛС РТВ. Обґрунтовано методику практичного використання розробленого імітатора, достовірність якої підтверджено в ході експериментальних досліджень. Застосування технології програмновизначеного радіо забезпечує оперативне керування видом та параметрами вихідних перешкод імітатора без зміни його принципової схеми. Досліджений пристрій дозволяє відтворювати різновиди перешкодової обстановки, які охоплюють переважну більшість можливих варіантів застосування ПАП. Програмно-апаратний комплекс можна застосовувати для проведення тактичних навчань підрозділу РТВ та під час навчальних занять для імітації дії ПАП повітряного базування або ППЗ. Перспективою подальших досліджень у цьому напрямку

є доопрацювання комплексу та методики його використання для перевірки ефективності роботи систем компенсації перешкод діючих зразків РЛС РТВ.

### **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Аналіз застосування угруповання повітряно-космічних сил Російської Федерації у Сирійській Арабській Республіці / С. І. Корсунов, О. В. Лезік, Ю. О. Галкін та ін. // Зб. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. Харків : ХНУПС, 2020. № 4 (66). С. 7–18. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.01>
2. Шамко В. Є., Жарик О. М., Коваль В. В. Розвиток форм і способів застосування Повітряних Сил Збройних Сил України в сучасних умовах ведення збройної боротьби // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків : ХНУПС, 2018. № 2 (31). С. 9–15. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.31.01>
3. Сучасне озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації. Довідник учасника ООС / С. П. Корнійчук, О. В. Турінський, Г. В. Певцов та ін. [За заг. ред. С. П. Корнійчука]. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2020. 1220 с.
4. Алімпієв А. М., Певцов Г. В. Особливості гібридної війни РФ проти України. Досвід, що отриманий Повітряними Силами Збройних Сил України // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків : ХНУПС, 2017. Вип. 2 (27). С. 19–25.
5. Аксьонов П. Чому Азербайджан виграв війну у Карабаху? Відповідають військові експерти. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-54912350> (дата звернення: 01.06.2022).
6. Російські засоби РЕБ у бойових діях на Донбасі. URL: <http://www.ukrmilitary.com/2016/05/russian-reb-v-donbasse.html> (дата звернення: 10.06.2022).
7. Lavrov A. Russian UAVs in Syria // Moscow Defense Brief. 2017. № 2 (58). URL: <http://mdb.cast.ru/mdb/2-2017/item3/article4/> (last accessed: 10.06.2022).
8. Яцук К. В., Стафеев М. С., Казаринов С. В. Применение беспилотных летательных аппаратов в локальных конфликтах и войнах // Молодой ученый. 2016. № 25. С. 107–111. URL: <https://moluch.ru/archive/129/35666/> (дата обращения: 10.06.2022).
9. Кучеренко Ю. Ф., Гузько О. М. Деякі особливості сучасних локальних війн // Зб. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. Харків : ХНУПС, 2008. № 2 (17). С. 20–23.
10. Грызо А. А., Гриб Д. А., Лещенко С. П. Анализ опыта построения имитационных комплексов // Системы обработки інформації. Харків : ХНУПС, 2006. Вип. 5. С. 17–24.
11. Методика використання малопотужних наземних передавачів активних шумових перешкод для імітації перешкодової обстановки оглядовим радіолокаційним станціям / В. Й. Климченко, С. В. Кукобко, В. О. Тютюнник, Г. В. Рибалка // Системи озброєння і військова техніка. Харків : ХНУПС, 2018. Вип. 4. С. 27–34. <https://DOI:10.30748/soivt.2018.56.04>
12. Климченко В. Й., Лупандін В. А., Закіров С. В. Удосконалення методики розрахунку захищеності оглядових радіолокаційних станцій радіотехнічних військ від активних шумових перешкод // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків : ХНУПС, 2020. Вип. 1 (34). С. 51–57. <https://DOI:10.30748/nitps.2019.34.07>
13. Хмарский П. А., Алирио Р. – К. Д., Соловйов А. И. Программно-аппаратный имитатор первичных радиолокационных сигналов диспетчерского радиолокатора // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2017. Вып. 4. С. 112–121.

14. Зюкин В. Ф., Свистунов Д. Ю., Белавин А. В. Требования к удалению имитаторов активных помех при полигонных испытаниях РЛС // Системы обработки інформації. Харків : ХНУПС, 2013. Вип. 1. С. 56–60.
15. Павлюк В. В. Програмно визначене радіо. Вигляд ізсередини. Житомир : Вид-вець О. О. Євенок, 2021. 680 с.
16. Бібліотека gr-osmosdr B210. URL: <https://packages.debian.org/ru/sid/gr-osmosdr> (last accessed: 10.06.2022).
17. Модуль GNURadio DTV. URL: <https://github.com/gnuradio/gnuradio/tree/master/gr-dtv> (last accessed: 10.06.2022).
18. Сіденко В. П., Кубрак О. М. Основи теорії радіоелектронного подавлення та радіоелектронної розвідки. Ч. 1. Основи теорії радіоелектронного подавлення. Житомир : ЖВІРЕ, 2006. 248 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2022.

## REFERENCES

1. Korsunov, S. I., Lezik, O. V., & Halkin, Yu. O. et al. (2020). Analiz zastosuvannia uhrupovannia povitriano-kosmichnykh syl Rosiiskoi Federatsii u Syriiskii Arabskii Respublitsi [Analysis of the use of the air and space forces of the Russian Federation in the Syrian Arab Republic]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Collection of Sciences. works of the Kharkiv National Air Force University]*, 4 (66), 7–18. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.01> Kharkiv [in Ukrainian].
2. Shamko, V. Ye., Zharyk, O. M., & Koval, V. V. (2018). Rozvytok form i sposobiv zastosuvannia Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy v suchasnykh umovakh vedennia zbroinoi borotby [Development of forms and methods of use of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine in modern conditions of armed struggle]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Force of Ukraine]*, 2 (31), 9–15. Kharkiv: KhNAFU. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.31.01> [in Ukrainian].
3. Korniiichuk, S. P., Turinskyi, O. V., & Pievtsov, H. V. et al. (2020). *Suchasne ozbroiennia i viiskova tekhnika Zbroinykh Syl Rosiiskoi Federatsii. Dovidnyk uchasnyka OOS [Modern weapons and military equipment of the Armed Forces of the Russian Federation. Handbook of the OOS participant]*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Alimpiiev, A. M., & Pievtsov, H. V. (2017). Osoblyvosti hibrydnoi viiny RF proty Ukrainy. Dosvid, shcho otrymani Povitrianymy Sylamy Zbroinykh Syl Ukrainy [Features of the hybrid war of the Russian Federation against Ukraine. Experience gained by the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Force of Ukraine]*, 2 (27), 19–25. Kharkiv: KhNAFU [in Ukrainian].
5. Aksonov, P. (n.d.). *Chomu Azerbaidzhan vyhrav viinu u Karabakhu? Vidpovidaiut viiskovi eksperty [Why did Azerbaijan win the war in Karabakh? Military experts are responsible]*. Retrieved from <https://www.bbc.com/ukrainian/features-54912350> [in Ukrainian].
6. *Rosiiski zasoby REB u boiovykh diiakh na Donbasi [Russian EW means in combat operations in Donbas]*. (n.d.). Retrieved from <http://www.ukrmilitary.com/2016/05/russian-reb-v-donbasse.html> [in Ukrainian].

7. Lavrov, A. (2017). Russian UAVs in Syria. *Moscow Defense Brief*, 2 (58). Retrieved from <http://mdb.cast.ru/mdb/2-2017/item3/article4/>
8. Iatsuk, K. V., Stafeev, M. S., & Kazarinov, S. V. (2016). Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov v lokal'nykh konfliktakh i voynakh [Application of unmanned aerial vehicles in local conflicts and wars]. *Molodoi uchenyi [Young scholar]*, 25, 107–111. Retrieved from <https://moluch.ru/archive/129/35666/> [in Russian].
9. Kucherenko, Yu. F., & Huzko, O. M. (2008). Deiaki osoblyvosti suchasnykh lokalnykh viin [Some features of modern local wars]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Collection of Sciences. works of the Kharkiv National Air Force University]*, 2 (17), 20–23. Kharkiv [in Ukrainian].
10. Gryzo, A. A., Grib, D. A., & Leshchenko, S. P. (2006). Analiz opyta postroeniia imitatsionnykh kompleksov [Analysis of the experience of building simulation complexes]. *Systemy obrobky informatsii [Information processing systems]*, 5, 17–24. Kharkiv [in Ukrainian].
11. Klymchenko, V. Y., Kukobko, S. V., Tiutiunyk, V. O., & Rybalka, H. V. (2018). Metodyka vykorystannia malopotuzhnykh nazemnykh peredavachiv aktyvnykh shumovykh pereshkod dlia imitatsii pereshkodovoi obstanovky ohliadovym radiolokatsiynym stantsiiam [The technique of using low-power ground transmitters of active noise interference for simulating the interference situation of surveillance radar stations]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Armament systems and military equipment]*, 4, 27–34. <https://DOI:10.30748/soivt.2018.56.04> Kharkiv [in Ukrainian].
12. Klymchenko, V. Y., Lupandin, V. A., & Zakirov, S. V. (2020). Udoskonalennia metodyky rozrakhunku zakhyshchenosti ohliadovykh radiolokatsiynykh stantsii radiotekhnichnykh viisk vid aktyvnykh shumovykh pereshkod [Improvement of the methodology for calculating the protection of surveillance radar stations of the radio engineering troops against active noise interference]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and Technology of the Air Force of Ukraine]*, 1 (34), 51–57. Kharkiv: KhNAFU. <https://DOI:10.30748/nitps.2019.34.07> [in Ukrainian].
13. Khmarskii, P. A., Alirio, R. – K. D., & Soloviov, A. I. (2017). Programmno-apparatnyi imitator pervichnykh radiolokatsionnykh signalov dispetcherskogo radiolokatora [Hardware-software simulator of primary radar signals of dispatching radar]. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, iazyk [Crede Experto: transport, society, education, language]*, 4, 112–121 [in Russian].
14. Ziukin, V. F., Svistunov, D. Iu., & Belavin, A. V. (2013). Trebovaniia k udaleniiu imitatorov aktivnykh pomekh pri poligonnykh ispytaniakh RLS [Requirements for the removal of active interference simulators during field testing of radar stations]. *Systemy obrobky informatsii [Information processing systems]*, 1, 56–60. Kharkiv: KhNAFU [in Russian].
15. Pavliuk, V. V. (2021). *Prohramno vyznachene radio. Vyhliad izseredyny [Software Defined Radio. View from the inside]*. Zhytomyr [in Ukrainian].
16. Biblioteka gr-osmosdr B210. [Library gr-osmosdr B210]. (n.d.). Retrieved from <https://packages.debian.org/ru/sid/gr-osmosdr> [in Ukrainian].
17. Modul GNU Radio DTV. (n.d.). Retrieved from <https://github.com/gnuradio/gnuradio/tree/master/gr-dtv> [in Ukrainian].

18. Sidenko, V. P., & Kubrak, O. M. (2006). *Osnovy teorii radioelektronnoho podavlennia ta radioelektronnoi rozvidky. Ch. 1. Osnovy teorii radioelektronnoho podavlennia [Basics of the theory of radio electronic suppression and radio electronic intelligence. Part 1. Basics of the theory of radio electronic suppression]*. Zhytomyr [in Ukrainian].

**O. O. Kostyria, A. A. Hryzo, O. M. Dodukh, I. M. Nevmerzhytskyi, O. A. Nahorniuk, V. M. Miniailo**

**RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF MULTI-BAND SIMULATOR OF THE MANUFACTURER OF ACTIVE NOISE JAMMER**

*The article provides information on the results of experimental studies of a multi-band hardware and software complex for simulating the action of an active noise jammer, which has been created for the training of operators of radar stations of radio engineering troops.*

*One of the important elements of the professional training of the radar stations operators of the air defense radio engineering forces is their ability to work in difficult target and jamming conditions.*

*The existing simulators for training operators do not fully meet the requirements of the quality of training, since they form only secondary bearing marks on the jammer manufacturer and do not reproduce the situation of deterioration of target detection conditions as a result of the simultaneous action of active and passive noise jammer, as well as the influence of the autocompensator of jammer on the quality of the radar, as it happens in real situation.*

*The offered device for simulating the influence of active jammer has been built according to the modular principle and implemented using software-defined radio technology, which allows to quickly change both the type of signal and its parameters. Power amplifiers and antenna systems have been designed to operate in the 140–190 MHz, 470–900 MHz, and 2500–3500 MHz bands, and for experimental research radar stations in the meter, decimeter, and centimeter wave ranges have been involved.*

*The method of using the simulator has been substantiated, and the conducted studies showed that for radar stations in which the angular beams of the directional pattern have different operating frequencies, there is an additional possibility of simulating the action of the active jammer by changing the frequency of the jammer in the case of operation of the complex directly near the suppression object, where the directional pattern of the radar station antenna has not yet been formed. The method of using the complex both for training sessions and during tactical exercises of the radio technical troops unit to simulate the action of an air-based jamming device or a dropped jamming transmitter has been substantiated.*

**Keywords:** active noise jammer; simulation; hardware and software complex; radar station; programmed radio.

В. А. Таршин, Г. С. Залевський, О. В. Очкурєнко, Р. Л. Стовба

## ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ РАДІОЛОКАТОРАМИ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВІЙСЬК

Номенклатура повітряних літальних апаратів швидко розширюється і на даний час включає об'єкти від гіперзвукових літаків до малих безпілотних літальних апаратів. Відповідно, контроль повітряного простору повинен здійснюватися за всіма типами літальних апаратів. У статті розглянуто особливості радіолокаційного виявлення дуже складних для засобів активної локації об'єктів – безпілотних літальних апаратів тактичного й оперативно-тактичного рівнів. Їх тактико-технічні характеристики, особливості конструкції та тактика застосування дозволяють виконувати бойові завдання іноді без виявлення системою протиповітряної оборони противника. У роботі визначено фактори та особливості, які зумовлюють несвоєчасне виявлення об'єктів типу безпілотних літальних апаратів радіолокаційними станціями радіотехнічних військ або призводять до складнощів їх спостереження. Досліджено шляхи покращення радіолокаційного спостереження таких дронів. Проаналізовано досвід бойового застосування безпілотних літальних апаратів у зоні проведення операції Об'єднаних сил на сході України у 2014–2022 роках, сирійському воєнному конфлікті, Другій карабаській війні 2020 року та сучасній російсько-українській війні. Встановлено важливі фактори, які сприяли ефективному застосуванню безпілотних літальних апаратів. Наведено узагальнену інформацію щодо зміни особливостей збройних конфліктів, спричиненої можливостями такого виду озброєння. Показано, що наявні розвідувально-бойові можливості безпілотних літальних апаратів швидко змінюють не лише тактику використання озброєння та військової техніки збройних сил, а й стратегію ведення протистояння. Достатньо велика увага відведена аналізу масового використання безпілотних літальних апаратів різного типу в сучасній російсько-українській війні.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; виявлення малопомітних об'єктів; пасивна завада; радіолокаційна станція; радіотехнічні війська.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Безпілотні літальні апарати (БпЛА) різних типів широко застосовують для виконання завдань цивільного та військового призначення: картографування, спостереження за рухомими (нерухомими) об'єктами, доставляння вантажів, розвідки, ретрансляції сигналів, збирання, накопичення та обробки даних, цілевказання й ураження об'єктів, корегування вогню засобів ураження тощо [1–3].

Залежно від призначення БпЛА можуть мати різні електричні розміри. Проте мікро, міні, малим та тактичним БпЛА характерні спільні властивості: як правило, вони мають незначну кількість металевих елементів конструкції та порівняно невеликі електричні розміри в метровому і дециметровому діапазонах частот. Ці фактори призводять до низького рівня вторинного розсіювання електромагнітних хвиль, що значно ускладнює їх радіолокаційне виявлення та супроводження [4–8]. Крім того, відносно низька швидкість

© В. А. Таршин, Г. С. Залевський, О. В. Очкурєнко, Р. Л. Стовба, 2022

і мала висота польоту додатково ускладнюють їх радіолокаційне спостереження на фоні пасивних завод.

Оперативно-тактичні, оперативно-стратегічні БпЛА мають конструктивні елементи планера, виготовлені з металевих сплавів або вуглепластику, і достатньо великі електричні розміри. Як наслідок, їх ефективна площа розсіювання (ЕПР) співмірна з традиційними аеродинамічними цілями типу літака-винищувача. Їх швидкість перевищує 500 км/год. Такі БпЛА слід розглядати як типові аеродинамічні цілі, їх радіолокаційне спостереження має багато спільного з традиційними об'єктами пілотованої авіації. Однак досвід останніх локальних війн і збройних конфліктів показує, що оперативно-тактичні й оперативно-стратегічні БпЛА є набагато складнішими об'єктами для виявлення і вогневого ураження, ніж об'єкти пілотованої авіації [3, 4, 9–14]. На жаль, у даний час утворився значний розрив між можливостями їх виявлення будь-якими засобами і безпосередньо можливостями з виконання бойових завдань ними.

Важливо додати, що воєнні доктрини багатьох країн (зокрема США та російської федерації (рф)) констатують зростання значущості сучасних технологій у збройних конфліктах [11, 14, 15]. Йдеться про використання високоточного ракетного озброєння, систем радіоелектронної боротьби, БпЛА різних типів та інших видів зброї (передусім високоточної) для максимального ураження об'єктів на всю глибину оперативної побудови військ противника.

У цілому широке застосування БпЛА в збройних конфліктах, стрімкий розвиток їх технічного оснащення й різноманіття тактичного використання вимагає переоцінки рівня їх потенційної загрози. Завдання протидії БпЛА повинне отримати новий, більш високий пріоритет. У контексті цього дуже актуальним є питання своєчасного надійного виявлення таких складних об'єктів, як БпЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [11, 15] зазначено, що під час активних бойових дій у Луганській та Донецькій областях упродовж 2014–2015 рр. унаслідок несвоечасного виявлення Збройними Силами (ЗС) України розвідувальних БпЛА, які постачала рф незаконним військовим формуванням, було отримано близько 85% всіх бойових втрат серед українських підрозділів. Зростання концентрації радіолокаційних станцій (РЛС) радіотехнічних військ (РТВ) Повітряних Сил України не привело до суттєвого покращення ситуації, що зумовлено малими висотами застосування БпЛА та високою потужністю відбиття сигналів від підстильної поверхні й розташованих на ній предметів. У роботі [16] обґрунтовано, що виявлення тактичних БпЛА радіолокаторами РТВ на дальностях 10–20 км є недоцільним і невиправданим.

У роботі [15] показано, що в ході бойових дій підрозділи рф на рівні батальйону і вище обов'язково використовували БпЛА для розвідки, цілевказівки та корегування вогневого ураження. При цьому вказано на погані спроможності підрозділів рф щодо виявлення та супроводження власних БпЛА.

Аналіз матеріалів [3, 10–12] щодо вірменсько-азербайджанського конфлікту 2020 року дозволяє зробити висновки, що однією з головних умов успішних дій ЗС Азербайджану є ставка на використання високотехнологічних повітряних засобів, які першими надавали інформацію про противника.



Достатньо важливим є аналіз досвіду сучасного сирійського конфлікту. У роботах [11–14] описані результати високоефективної взаємодії БпЛА, підрозділів вогневого ураження і радіоелектронної боротьби (РЕБ). У той же час спостерігається погана спроможність сучасних засобів протиповітряної оборони (ППО) виявляти БпЛА й висока вразливість основних зразків озброєння та військової техніки від ударних безпілотників.

Підсумки перших місяців активної фази сучасної війни між Україною та РФ свідчать про масоване використання БпЛА всіма рівнями угруповань, частин та підрозділів обома сторонами [17]. Аналітики Міністерства оборони Великої Британії відзначають, що в російсько-українській війні БпЛА відіграють вирішальну роль для обох сторін [17]. Одночасно відзначається їх вразливість, у разі застосування електронних перешкод і впливу станцій системи РЕБ, а також можливість збиття.

У цілому, проведений аналіз свідчить про малу ефективність сучасних РЛС щодо своєчасного виявлення малопомітних та малошвидкісних повітряних об'єктів, наприклад, тактичного БпЛА. Очевидно, що ефективна протидія безпілотникам вимагає комплексного підходу, а визначення шляхів покращення радіолокаційного виявлення БпЛА і зараз, і ще тривалий час буде об'єктом досліджень.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є проведення аналізу реального досвіду виявлення малорозмірних та малошвидкісних повітряних об'єктів під час збройних конфліктів, дослідження особливостей роботи РЛС та факторів, які зумовлюють несвоєчасне виявлення об'єктів типу БпЛА.

## **Виклад основного матеріалу**

### **1. Особливості виявлення цілей типу БпЛА РЛС РТВ**

На даний час ЗС різних країн світу докладають достатньо зусиль для насичення тактичної й оперативної-тактичної ланок БпЛА. Практично жодне тренування (навчання) підрозділів рівня батальйону і вище не відбувається без залучення безпілотників розвідки, цілевказівки та корегування вогню засобів вогневого ураження. При цьому деякі країни, зокрема РФ, вказують на необхідність удосконалення засобів виявлення малорозмірних повітряних об'єктів унаслідок недостатньої якості (інколи неможливості) їх викриття та супроводження власних БпЛА. Тому доцільним є аналіз особливостей та факторів, які заважають цьому.

Найбільш вагомим є досвід застосування різних типів БпЛА під час збройної агресії РФ проти України. З моменту початку війни на сході України у 2014 році військовими фахівцями спостерігається застосування РФ для виконання різних завдань безпілотників близько чотирьох десятків типів. Найбільше розповсюдження знаходять легкі дрони «Гранат-1, 2, 3, 4», «Застава», «Орлан-3М», «Орлан-10», «Элерон-3», «Тахион», «Zala» та середні «Форпост», «Дозор-100».

Ефективність поєднання сучасних розвідувальних БпЛА та систем ураження продемонстрували активні бойові дії в Донецькій та Луганській областях. За різними підрахунками впродовж 2014–2015 рр. до 85% усіх бойових втрат серед українських підрозділів є наслідком роботи артилерії противника в поєднанні з розвідувальними БпЛА [15, 17]. При цьому, незважаючи на високий енергетичний потенціал РЛС РТВ, фактів виявлення тактичних БпЛА дуже мало. Це зумовлено малими висотами польотів

безпілотників та високою потужністю пасивних завад (ПЗ). Цей фактор настільки суттєво впливає на якість викриття, що в [16] вказано на недоцільність і невиправданість здійснення виявлення тактичних БпЛА на дальностях 10–20 км радіолокаторами РТВ. Оскільки інтенсивність ПЗ пропорційна потужності зондувальних сигналів, то надмірна потужність випромінення РЛС частіше призводить до ускладнення виявлення БпЛА. Це пояснюється тим, що в системі селекції рухомих цілей (СРЦ) інколи не вистачає ступеня компенсації завад для достатнього подавлення ПЗ, тому процедура виявлення цілей проходить на фоні великих залишків завад. Відповідно, надмірний енергетичний потенціал РЛС для викриття БпЛА шкодить. На жаль, у всіх РЛС РТВ України для виявлення БпЛА на дальностях до 30–50 км енергетичний потенціал локаторів занадто високий.

Отже, для якісного виявлення БпЛА РЛС необхідне обов'язкове узгодження потужності її зондувальних сигналів з дальністю виявлення БпЛА відповідних класів (або узгодження з просторовими неоднорідностями) та введення спеціальних режимів роботи РЛС щодо БпЛА.

Значно краща ситуація з виявленням оперативно-тактичних, оперативно-стратегічних БпЛА внаслідок їх більшої ЕПР, швидкості й висоти польоту та відсутності потужних віддзеркалень від земної поверхні. Однак при цьому виникають інші труднощі, пов'язані зі складністю ураження (інколи необхідно знешкоджувати безпілотник на межі дальності роботи зенітно-ракетних комплексів (ЗРК), головки теплового наведення не завжди спроможні точно наводитись на ціль) та й фінансовий аспект не сприяє розв'язанню такої проблеми. Практика довела, що в разі використання ЗРК «Панцир», «Бук» боротьба з такими БпЛА може бути ефективною, але не завжди економічно виправданою [12–14]. Однак у даній роботі аспект знищення БпЛА розглядатися не буде.

Досвід використання БпЛА рф проти ЗС України та безпілотників підрозділів ОБСЄ в районі проведення операції Об'єднаних сил на сході України свідчить про достатню велику кількість випадків, коли виявлення та супроводження БпЛА здійснювалося на фоні цілеподібних відміток (хибних цілей) від метеоутворень типу «ангел-луна».

Експериментальні дані показують, що в разі тривалої роботи РЛС фіксується достатньо значна кількість відміток (до кількох сотень) метеоутворень типу «ангел-луна». За таких умов відчувається недостатність сучасної вторинної обробки радіолокаційних сигналів та висуваються високі вимоги до підготовленості операторів РЛС. Важливо зазначити, що сигнали від «ангел-луна» мають меншу швидкість руху, ніж БпЛА, і поширюються більш хаотично внаслідок впливу вітру. Крім того, вектор руху метеоутворень типу «ангел-луна» має здебільшого вертикальний характер, що суттєво відрізняється від переважно горизонтальних траєкторій польоту БпЛА.

Згідно з експериментальними даними БпЛА відповідає більш чітка траса порівняно з трасами, зумовленими відбиттям від хибних цілей. Слід очікувати швидкості польоту тактичних, оперативно-тактичних безпілотників в інтервалі від 70 км/год до 220 км/год за незначних змін висоти. З досвіду, висота польоту тактичних, оперативно-тактичних БпЛА переважно становить 50–300 м або більше 2000 м, на відміну від цілеподібних метеоутворень «ангел-луна», які, як правило, можуть скупчуватися на менших висотах (до

1500 м). Тому використання інформації про висоти виявлення повітряних об'єктів є важливим.

З наведених даних випливає важлива практична рекомендація для РЛС, у яких можливо оперативно змінювати пороги виявлення. Так, для РЛС типу 19Ж6 (35Д6) виявлення БпЛА бажано здійснювати в режимі «лупа» з мінімально встановленими порогами виявлення за швидкістю (знизити рівень стабілізації рівня хибної тривоги). Приймати рішення про захоплення (ініціалізацію) траси БпЛА має оператор РЛС. Це зумовлює необхідність пошуку шляхів удосконалення системи підготовки операторів РЛС.

З іншого боку, актуальним завданням є необхідність удосконалення системи вторинної обробки радіолокаційних сигналів, основна мета якої – це забезпечення ефективного супроводження БпЛА на фоні великої кількості віддзеркалень від місцевих предметів та метеоутворень типу «ангел-луна».

На даний час майже обов'язковим є використання інформації про висоти виявлених повітряних об'єктів. Відповідно, пріоритетною є радіолокаційна інформація від РЛС, які забезпечують найкращу точність визначення координат повітряних об'єктів та роздільну здатність за висотою (кутом місця).

Отже, для якісного виявлення БпЛА РЛС необхідним є: покращення якості виділення сигналів на фоні нестационарних шумових процесів, удосконалення селекції для траєкторної обробки, обов'язкове використання повного масиву радіолокаційної інформації про ціль. Крім того, бажано мати можливість адаптивного змінення значень показників якості виявлення сигналів залежно від сигнально-завадової обстановки.

## **2. Досвід отримання інформації про БпЛА у збройних конфліктах**

### **2.1. Досвід виявлення БпЛА в Другій карабаській війні**

Вірменія концентрувала зусилля на нарощенні сухопутної складової ЗС, а Повітряні Сили отримали 4 багатоцільові винищувачі Су-30СМ. Азербайджан, за співмірної витрати коштів, разом із підсиленням сухопутних військ закупив десятки безпілотних авіаційних комплексів турецького та ізраїльського виробництва [3]. За рахунок цього ЗС Азербайджану реалізували перевагу в повітрі, у підсумку БпАК завдали втрат більше, ніж усі інші види озброєння разом узяті.

Вірменсько-азербайджанський конфлікт (2020 р.) продемонстрував приклад швидкого ведення бойових дій за приблизно схожого складу озброєння, техніки й живої сили. Азербайджан мав єдину технологічну перевагу – найсучасніші БпЛА на основі турецьких та ізраїльських розробок [3, 10–12], які масово й постійно використовував. Це зумовило наявність важливої тактичної переваги – можливості першого виявлення угруповань і техніки противника для подальшого використання високоточної зброї. Після знищення Азербайджаном [3, 12] достатньо потужної системи ППО Вірменії (близько 40 об'єктів) у перші дні конфлікту вірменські сили втратили можливість контролю повітряного простору, а ЗС Азербайджану отримали стратегічну ініціативу для подальшого ведення бойових дій.

Особливістю Карабаської війни у 2020 році є те, що обидві сторони конфлікту майже не використовували пілотовану авіацію. Азербайджанські ЗС зробили акцент на використанні турецьких оперативно-тактичних БпАК «Bayraktar TB2». Для розвідки на великі відстані (більше 80 км) застосовувалися БпЛА ізраїльського виробництва «Heron»,

«Hermes», дрон-розвідник Aerostar. Також, за даними публікацій [10, 12], у Другій карабаській війні широко застосовувалися дрони-камікадзе (боєприпаси, які баражують), зокрема «Sky Striker», «Harop», «Orbiter-1K» та «Orbiter-3».

За оприлюдненими даними [3, 12], загальні втрати вірменських ЗС унаслідок застосування БпЛА та БпАК Азербайджану становили більше ніж 60%, а за деякими типами озброєння і військової техніки (реактивні системи залпового вогню, артилерія, самохідні артилерійські установки) ця частка перевищила 90%. При цьому, незважаючи на масове застосування ЗС Азербайджану БпЛА, Вірменією зафіксовано лише чотири факти їх знищення (наявним фотодокументуванням підтверджено два), що вкрай мало для ефективного протистояння діям повітряного противника.

Для викриття угруповань ППО ЗС Вірменії застосовувалися літаки старого парку Ан-2, які були доопрацьовані як дистанційно керовані літальні апарати (максимальна дальність управління 12 км.). У свою чергу, Вірменія, маючи достатню кількість літаків (зокрема чотири нові багатоцільові винищувачі Су-30СМ), жодного разу не підняла їх у повітря: на початку конфлікту внаслідок надмірної обережності й неочевидної раціональності використання авіації, а після втрати можливості контролю повітряного простору – унаслідок високої ймовірності втрати.

У результаті Друга карабаська війна стала першим збройним конфліктом, у якому основні традиційні завдання авіації (розвідка, цілевказання, завдання бойових ударів) виконали БпЛА. Використання різних малопомітних безпілотників, які працювали з різних рубежів, дозволило реалізувати перевагу в швидкості розвідки бойових порядків противника, здійсненні цілерозподілу, корегуванні результатів бойового ураження.

Наявна відкрита інформація про цю війну дозволяє зробити висновок про те, що низька ефективність виявлення та супроводження азербайджанських БпЛА засобами радіолокації Вірменії спричинила можливість панування в повітрі безпілотників Азербайджану. Головною передумовою цього стало використання радіолокаційних засобів виявлення так званого «старого парку» вірменською стороною, які не придатні для пошуку цілей з малою ЕПР, і тим більше в разі впливу потужних віддзеркалень в умовах гірської місцевості.

Аналіз результатів Другої карабаської війни чітко сигналізує, що невідповідність спроможностей озброєння і військової техніки підрозділів оборони й нападу навіть в одному аспекті може мати критичні наслідки, а відставання у можливостях виявлення цілей і контролю повітряного простору повністю віддає ініціативу противнику в повітрі та на суходолі.

## **2.2. Досвід виявлення БпЛА під час сирійського конфлікту**

Заслугове на увагу за інтенсивністю застосувань БпЛА різних типів сучасний сирійський конфлікт. На жаль, є обмеження на достовірну інформацію про кількість здійснених польотів, кількість випадків бойового застосування, відсоток вдалих (невдалих) застосувань, кількість (типи) уражених об'єктів, кількість збитих БпЛА, за яких умов це відбувалося тощо. Однак наявна інформація [11–14] дає можливість зробити висновок, що Туреччина створила діючу систему мережецентричної війни, у якій значна частина завдань оперативно перерозподіляється залежно від чинного на даний час критерію ефективності досягнення результату. Досвід бойового застосування турецькою

стороною в сирійському Ідлибі у 2020 році [11, 12] наявної системи БпЛА і зв'язаних з ними наземних складових ЗС проти сирійської армії, яка технічно, технологічно, ресурсно та консультативно підтримувалась РФ, свідчить про недостатню спроможність сучасних засобів ППО протидіяти різним типам БпЛА, зокрема ударним безпілотникам.

Спроби зс РФ переламати ситуацію, що склалася з використанням БпЛА в Сирії, за допомогою інтегрування системи РЕБ (широко застосовувалися засоби «Автобаза-М», «Репеллент-1», «Борисоглебск-2», «Гроза-С») у систему ППО не дали дієвого результату. Як показує досвід, сучасний рівень автономності роботи бойових БпЛА і ступінь їх захисту від впливу системи РЕБ дозволяє ефективно виконувати поставлені бойові завдання.

У свою чергу, турецькі ЗС демонстрували дуже добре скоординовані бойові операції груп БпЛА, які за підтримки комплексів радіоелектронного подавлення KORAL і REDETEW ефективно долали систему ППО противника. За даними [12], в умовах впливу системи РЕБ дальність виявлення БпЛА падала до 4–6 км, і першими виявлення противника, видачу цілевказівок і розвідданих здійснювали безпілотники. Крім того, була добре відпрацьована тактика масового застосування ударних Bayraktar TB2 під прикриттям важких розвідувальних БпЛА «Анка», обладнаних засобами радіолокаційної і радіотехнічної розвідки, оптичного моніторингу, комплексами РЕБ. У результаті Bayraktar TB2 майже завжди першими атакували позиції противника. Отже, можна констатувати, що ударні БпЛА замість об'єкта ураження стають ефективними засобами знищення системи ППО противника.

На думку експертів [11–14], саме поєднання реальної помітності та швидкості польоту БпЛА разом з їх високотехнологічним оснащенням дозволяє нівелювати спроможності засобів контролю повітряного простору зі своєчасного виявлення безпілотників. Така ситуація стала можливою, тому що майже 100% РЛС контролю повітряного простору реалізують концепцію виявлення повітряних об'єктів, яка була актуальною в 1980–1990 рр. Так, радіолокаційні засоби, які перебувають на озброєнні підрозділів ППО, за своїми тактико-технічними характеристиками здатні виявляти цілі типу «крилата ракета», що приблизно відповідає оперативно-тактичним БпЛА. Виявлення тактичних безпілотників здебільшого відбувається в ході візуального спостереження таких об'єктів особовим складом підрозділів.

### **2.3. Досвід виявлення БпЛА під час російсько-української війни**

Російсько-українська війна виявила декілька важливих особливостей, обумовлених застосуванням БпЛА. Перша пов'язана з мобільністю підрозділів, озброєння і військової техніки. Усе більш актуальною для ЗС стає концепція «маневр – постріл – маневр». Обидві сторони докладають значних зусиль для своєчасного маневру, прихованого пересування і всебічного маскування військ, а розвіддані достатньо швидко втрачають актуальність. Тому набуває значущості завдання щодо створення дієвої мережі із системи розвідки (радіолокаційної, радіотехнічної, оптичної тощо), вискоефективних засобів автоматизованої системи управління, високоточних засобів ураження (артилерійських, ракетних, БпЛА-камікадзе). Російсько-українська війна продемонструвала, що на перший план вийшла важливість розвідданих саме від БпЛА, оскільки лише цей варіант розвідки має можливість у реальному масштабі часу надавати розвіддані з прив'язкою до системи

GPS і точного визначення координат противника, що необхідно для високоточних засобів ураження.

Друга особливість пов'язана з необхідністю застосування досконалої системи РЕБ. Наявний досвід на практиці довів, що наявного ступеня захисту БпЛА різного типу та класу рф і України недостатньо для ефективної протидії засобам системи РЕБ (станція «Нота» та її закордонні аналоги достатньо впевнено здійснюють перехоплення дронів і БпЛА, підміну координат тощо).

Третя особливість зумовлена діючою системою ППО. На відміну від Чечні, Грузії, Сирії, де рф використовувала власні зс, в Україні потужна система ППО. Під час перших масованих ударів російською стороною було знищено велику частину сил та засобів радіотехнічних і зенітно-ракетних військ. Однак достатньо швидко відбулася ротація підрозділів системи ППО, ЗС України отримали багато переносних ЗРК (ПЗРК) від країн НАТО. Сучасні РЛС П-18МА, П-18 «Малахіт», П-19МА, 35Д6М, 79К6 достатньо впевнено виявляють та спостерігають оперативно-тактичні БпЛА на відстані 30–35 км. За даними цілевказівок від підрозділів РТВ та результатами візуального виявлення БпЛА здійснюється застосування ПЗРК (типу «Ігла», «Stinger» тощо). Результати перших трьох місяців повномасштабного російського вторгнення довели вразливість БпЛА для ураження: станом на 14.06.2022 знищено 588 БпЛА оперативно-стратегічного рівня. У доповіді Міністерства оборони Великої Британії [17] зазначається, якщо рф продовжуватиме втрачати БпЛА нинішніми темпами, то можливості російських сил розвідки та спостереження значно погіршаться, а це негативно вплине на оперативну ефективність. Також зафіксовано факти знищення БпЛА «Форпост», «Оріон», «Орлан-10» за допомогою ЗРК «Бук-М1». Але оскільки ЗРК «Бук-М1» частіше застосовують для знищення крилатих ракет, то завдання ураження БпЛА наразі виконують ПЗРК типу «Ігла», «Stinger», «Starstreak» та інші. Найбільша кількість уражених безпілотників мали бензинові двигуни, оскільки вони залишали чіткий тепловий слід, на який надійно реагували головки самонаведення ПЗРК.

Четверта особливість пов'язана з виявленням та протидією міні- (мікро-) БпЛА. На теперішній час у російсько-українській війні обома використовується велика кількість мікродронів, які засобами радіолокації РТВ не виявляються. Але певний контроль можна здійснювати. У відсотковому співвідношенні найбільша кількість мікро-БпЛА виготовлена фірмами Autel Robotics та DJI. Фірма DJI розробила комплекс AeroScore, який відстежує, аналізує електронні сигнали дронів та видає інформацію про їх розташування, висоту, напрямок руху, швидкість, модель, серійний номер тощо. Так, у ході операції з оборони Києва декілька AeroScore фіксували в повітрі до 400 дронів фірми DJI [18]. Тобто, по-перше, є можливість віддаленого підключення до БпЛА та переведення його керування до нового командного джерела. Отже, використання дронів фірми DJI ризиковане, тому необхідно виконувати певні інструкції з безпеки й розширити використання AeroScore для боротьби з ними. По-друге, виникає дуже складне організаційно-технічне завдання щодо моніторингу повітряного простору засобами підрозділів ЗС України для фіксації дронів за категорією «свій – чужий», подальшого впливу на ворожі БпЛА та оптимального використання своїх.

П'ята особливість пов'язана зі співвідношенням оперативно-тактичних, тактичних БпЛА та завданнями, які вони виконують. Тактичні міні- (мікро-) БпЛА переважно

проводять оптичний моніторинг на невеликій віддалі від оператора, тобто розвідку лінії зіткнення. Мікро-БпЛА (наприклад, DJI Mavic, DJI Phantom, Autel Evo II) реально є витратним матеріалом, який достатньо швидко збивається або перехоплюється засобами РЕБ. Але оскільки їх вартість мала, а кількість пропозицій з продажу велика, то відновити втрати мікро-БпЛА не складно. Тобто це розвідний ресурс, який оперативно поповнюється та здатний ефективно виконувати завдання оптичного моніторингу невеликих за площею районів. У російсько-українській війні розвідка лінії зіткнення постійно якісно здійснюється обома сторонами.

У свою чергу, оперативно-тактичні БпЛА спеціально виготовляють для виконання специфічних, складних завдань із спостереження. Вони дозволяють вести точну різнодіапазонну розвідку майже за будь-яких умов протягом 10–25 годин з глибини фронту 30–50 км. Для ефективної протидії таким безпілотникам необхідна потужна система ППО і ЗРК середньої та великої дальності дії. На жаль, ворог має значну перевагу в ЗРК, а українська сторона намагається не ризикувати, оскільки оперативно-тактичні БпЛА є складним для поповнення ресурсом. Враховуючи, що рф до початку російсько-української війни мала до трьох тисяч оперативно-тактичних БпЛА різного типу, а Україна – декілька десятків (це відставання скорочується за рахунок допомоги країн НАТО), то спостереження глибини фронту на 20–50 км українською стороною досить ускладнене.

На жаль, подальше насичення ЗС України більшою кількістю мікро-БпЛА не змінить ситуації щодо повноти та глибини здійснення розвідки з повітряного простору, оскільки функціональні можливості цих дронів дуже обмежені. У свою чергу, оперативно-тактичні БпЛА можуть виконувати завдання, які частіше перекладають на мікробезпілотники. Крім того, різноманіття в рф оперативно-тактичних БпЛА дозволяє використовувати їх з різних рубежів відносно лінії зіткнення і, відповідно, організувати розвідку в декілька ешелонів. Це дає можливість оперативно планувати застосування БпЛА не лише для уникнення польотів безпілотників у зоні ураження українських ЗРК, а й для обльоту зон виявлення РЛС.

Отже, наявне співвідношення мікро- й оперативно-тактичних БпЛА ЗС України та рф створюють передумови для кращого отримання розвідданих для противника. Така ситуація вимагає від української сторони дієвих кроків для ліквідації переваги російської армії в кількості та якості БпЛА, а також значного покращення можливостей їх виявлення.

**Висновки.** У статті порушено питання виявлення малорозмірних та малошвидкісних повітряних об'єктів. Аналіз реального досвіду викриття тактичних, оперативно-тактичних БпЛА під час збройних конфліктів і дослідження особливостей застосування РЛС та факторів, які спричиняють несвоєчасне виявлення об'єктів типу БпЛА, дозволяють дійти таких висновків.

1. Досвід останніх локальних війн і конфліктів свідчить про те, що БпЛА стали ефективним інструментом ведення бойових операцій. Особливості сучасних військових безпілотників дозволяють ефективно виконувати бойові завдання здебільшого без їх виявлення засобами активної локації системи ППО противника.

Спостерігається тенденція збільшення ефективності застосування БпЛА для виконання завдання домінування в повітряному просторі й ураження озброєння та

військової техніки сухопутної складової ЗС, тому слід очікувати поступової зміни тактики та стратегії ведення війн.

2. Розвиток тактики застосування БпЛА і в подальшому буде ґрунтуватися на використанні малого значення їх ЕПР, особливостей рельєфу місцевості, маскувального ефекту віддзеркалень від земної поверхні та місцевих предметів, низької швидкості й малої висоти польоту тактичних БпЛА, на здійсненні польотів та використанні зброї оперативно-тактичних БпЛА до рубежів їх виявлення засобами радіолокаційного спостереження повітряного простору.

3. Відзначається невідповідність сучасних особливостей бойового застосування БпЛА наявним спроможностям їх виявлення засобами радіолокаційного контролю повітряного простору. При цьому різноманіття типів БпЛА дозволяє їх використовувати з різних рубежів відносно лінії бойового зіткнення, залишаючись поза зоною радіолокаційного виявлення.

4. Досвід роботи радіотехнічних військ вимагає наявності в РЛС режимів роботи, які враховують особливості виявлення маловисотних та малошвидкісних цілей. Процедура виявлення БпЛА повинна бути адаптована до малих значень ЕПР таких цілей. Принципово важливою особливістю цих РЛС повинна бути висока якість роботи системи селекції рухомих цілей.

5. Завдання ефективної боротьби із цілеподібними сигналами типу «ангел-луна» повинне вирішуватися системою вторинної обробки сигналів на основі використання удосконалених алгоритмів оброблення, спеціалізованих режимів випромінення, приймання та оброблення радіолокаційних сигналів РЛС, а також максимального застосування радіолокаційної інформації для аналізу (площинні координати повітряних об'єктів; висота, швидкість, вектор руху; тип об'єкта тощо).

6. Тактичні мікро-БпЛА не виявляються РЛС, але вони мають малий радіус бойової роботи і суттєво обмежені можливості зі збирання розвідданих, тому концентрувати зусилля для їх виявлення недоцільно. Вважаємо, що на даний час більш важливим є завдання ефективного виявлення оперативно-тактичних БпЛА, які в змозі проводити оптичне, радіотехнічне, радіолокаційне спостереження великих територій тривалий час.

Подальшою перспективою проведення подібних досліджень є систематизація та узагальнення інформації про виявлення БпЛА інших класів за різних умов радіолокації. Дослідження особливостей цього процесу та порядку використання безпілотників дозволить сформулювати пропозиції до технічних та організаційних заходів, які спрямовані на підвищення ефективності радіолокаторів з виявлення БпЛА різних класів.

## **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Сучасне озброєння і військова техніка Збройних сил Російської Федерації. Довідник учасника ООС / За ред. С. П. Корнійчука. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2020. 1220 с.
2. Markarian G., Staniforth A. Countermeasures for Aerial Drones. Boston, London : Artech House, 2021. 350 p.
3. Жарик О. М., Тристан А. В. Військова операція Азербайджану в Нагірному Карабасі в контексті розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2 (43). С. 19–24. doi: [10.30748/nitps.2021.43.02](https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.02)



4. Riabukha V. Radar surveillance of unmanned aerial vehicles (review) // Radioelectronics communication system. 2020. № 63 (11). P. 655–669. doi: [10.3103/S0735272720110011](https://doi.org/10.3103/S0735272720110011)
5. Sukharevsky O., Vasilets V., Orlenko V., Ryapolov I. Radar Scattering Characteristics of a UAV Model in X-band // IET Radar, Sonar & Navigation. 2020. Vol. 14, № 4. P. 532–537. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0243>
6. Zalevsky G., Sukharevsky O., Vasilets V. Integral equation modelling of unmanned aerial vehicle radar scattering characteristics in VHF to S frequency bands // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2021. Vol. 15, № 10. P. 1299–1309. <https://doi.org/10.1049/mia2.12164>
7. Zhang P., Yang L., Chen G., Li G. Classification of drones based on micro-Doppler signatures with dual-band radar sensors // Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL). 2017. P. 638–643. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293214>
8. Taha B., Shoufan A. Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 138669–138682. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2942944>
9. State of the Art and Problems of Defeat of Low, Slow and Small Unmanned Aerial Vehicles / A. Dudush, V. Tyutyunnik, I. Trofymov et al. // Advances in Military Technology. 2018. № 13 (2). P. 157–171. <https://doi.org/10.3849/aimt.01233>
10. Аксенов П. Война дронов в Карабахе: как беспилотники изменили конфликт между Азербайджаном и Арменией // BBC news. Русская служба. URL: <https://www.bbc.com/russian/features-54431129> (дата обращения: 25.05.2022).
11. Таран М. В., Шулежко В. В. Визначення способів протидії та зниження ефективності застосування безпілотних авіаційних комплексів із врахуванням аналізу локальних війн і збройних конфліктів сучасності // Зб. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. 2021. № 1 (67). С. 32–37. doi: [10.30748/zhups.2021.67.04](https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.04)
12. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В., Привалов А. А. Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитно-ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, в Ливии и в Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 163–191. doi: [10.24411/2410-9916-2020-10406](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10406)
13. Противостояние ЗРК «Панцирь-С1» и турецких БпЛА: репетиция войн будущего. URL: <https://topwar.ru/172126-protivostojanie-zrk-pancir-s1-i-tureckih-bpla-repeticij-voin-buduscego.html> (дата обращения: 25.05.2022).
14. Аналіз застосування угруповання повітряно-космічних сил Російської Федерації у Сирійській Арабській Республіці / С. І. Корсунов, О. В. Лезік, Ю. О. Галкін та ін. // Зб. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. 2020. № 4 (66). С. 7–18. doi: [10.30748/zhups.2020.66.01](https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.01)
15. Белесков М. Сучасний російський спосіб ведення війни: теоретичні основи і практичне наповнення. Аналітична доповідь. Київ : Центр безпекових досліджень, Нац. ін.-т стратегічних досліджень, 2021. 29 с.
16. Вишневський С. Д., Бейліс Л. В., Климченко В. Й. Потенційні можливості РЛС РТВ з виявлення оперативно-тактичних та тактичних безпілотних літальних апаратів // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2017. № 2. С. 92–98. doi: [10.30748/nitps.2017.27.18](https://doi.org/10.30748/nitps.2017.27.18)

17. Latest Defence Intelligence update on the situation in Ukraine - 21 May 2022. Ministry of Defence, United Kingdom government organization. URL: [https://twitter.com/DefenceHQ/status/1527888361763000321?ref\\_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1527888361763000321%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1\\_&ref\\_url=https%3A%2F%2Ftsn.ua%2Fato%2Frosiya-vtrachaye-bezpilotniki-ce-negativno-vpline-na-yiyi-operativnu-efektivnist-u-viyni-britanska-rozvidka-2067400.html](https://twitter.com/DefenceHQ/status/1527888361763000321?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1527888361763000321%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1_&ref_url=https%3A%2F%2Ftsn.ua%2Fato%2Frosiya-vtrachaye-bezpilotniki-ce-negativno-vpline-na-yiyi-operativnu-efektivnist-u-viyni-britanska-rozvidka-2067400.html) (last accessed: 21.05.2022).
18. Некрасов В. Орланы здесь – как пчелы, это наш главный враг. Сооснователь Аэроразведки Ярослав Гончар о войне дронов. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/publications/2022/04/30/686413/> (дата обращения: 30.04.2022).

Стаття надійшла до редакції 05.07.2022.

## REFERENCES

1. Korniiichuk, S. P., Turinskyi, O. V., & Pievtsov, H. V. et al. (2020). *Suchasne ozbroiennia i viiskova tekhnika Zbroinykh Syl Rosiiskoi Federatsii. Dovidnyk uchasnyka OOS [Modern weapons and military equipment of the Armed Forces of the Russian Federation. Handbook of the OOS participant]*. Kharkiv [in Ukrainian].
2. Markarian, G., & Staniforth, A. (2021). *Countermeasures for Aerial Drones*. Boston, London: Artech House.
3. Zharyk, O. M., & Trystan, A. V. (2021). Viiskova operatsiia Azerbaidzhanu v Nahirnomu Karabasi v konteksti rozvytku Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Azerbaijan's military operation in Nagorno-Karabakh in the context of the development of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]*, 2 (43), 19–24. doi: [10.30748/nitps.2021.43.02](https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.02) [in Ukrainian].
4. Riabukha, V. (2020). Radar surveillance of unmanned aerial vehicles (review). *Radioelectronics communication system*, 63 (11), 655–669. doi: [10.3103/S0735272720110011](https://doi.org/10.3103/S0735272720110011)
5. Sukharevsky, O., Vasilets, V., Orlenko, V., & Ryapolov, I. (2020). Radar Scattering Characteristics of a UAV Model in X-band. *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 14, № 4, 532–537. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0243>
6. Zalevsky, G., Sukharevsky, O., & Vasilets, V. (2021). Integralequation modelling of unmanned aerial vehicle radar scattering characteristics in VHF to S frequency bands. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 15, № 10, 1299–1309 <https://doi.org/10.1049/mia2.12164>
7. Zhang, P., Yang, L., Chen, G., & Li, G. (2017). Classification of drones based on micro-Doppler signatures with dual-band radar sensors. *Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – FALL)*, 638–643. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293214>
8. Taha, B., & Shoufan, A. (2019). Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research. *IEEE Access*, Vol. 7, 138669–138682. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2942944>
9. Dudush, A., Tyutyunnik, V., & Trofymov, I. et al. (2018). State of the Art and Problems of Defeat of Low, Slow and Small Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Military Technology*, 13 (2), 157–171. <https://doi.org/10.3849/aimt.01233>

10. Aksenov, P. (n.d.). Voina dronov v Karabakhe: kak bespilotniki izmenili konflikt mezhdru Azerbaidzhanom i Armeniei [Drone war in Karabakh: how drones have changed the conflict between Azerbaijan and Armenia]. *BBC news. Russkaia sluzhba [BBC news. Russian service]*. Retrieved from <https://www.bbc.com/russian/features-54431129> [in Russian].
11. Taran, M. V., Shulezhko, V. V. (2021). Vyznachennia sposobiv protydii ta znyzhennia efektyvnosti zastosuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv iz vrakhuvanniam analizu lokalnykh viin i zbroinykh konfliktiv suchasnosti [Determination of methods of countermeasures and reduction of the effectiveness of the use of unmanned aircraft systems, taking into account the analysis of local wars and modern armed conflicts]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Coll. of science works of the Kharkiv National Air Force University]*, 1 (67), 32–37. doi: [10.30748/zhups.2021.67.04](https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.04) [in Ukrainian].
12. Afonin, I. E., Makarenko, S. I., Petrov, S. V., & Privalov, A. A. (2020). Analiz opyta boevogo primeneniia grupp bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlia porazheniia zenitno-raketnykh kompleksov sistemy protivovozdushnoi oborony v voennykh konfliktakh v Sirii, v Livii i v Nagornom Karabakhe [Analysis of the experience of combat use of groups of unmanned aerial vehicles to destroy anti-aircraft missile systems of the air defense system in military conflicts in Syria, Libya and Nagorno-Karabakh]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti [Control, communication and security systems]*, 4, 163–191. doi: [10.24411/2410-9916-2020-10406](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-10406) [in Russian].
13. *Protivostoianie ZRK «Pantsir-S1» i turets'kikh BpLA: repetitsiia vojn budushchego [The confrontation between the Pantsir-S1 air defense system and Turkish UAVs: a rehearsal for the wars of the future]*. (n.d.). Retrieved from <https://topwar.ru/172126-protivostojanie-zrk-pancir-s1-i-tureckih-bpla-repeticij-vojn-buduscego.html> [in Russian].
14. Korsunov, S. I., Lezik, O. V., & Halkin, Yu. O. et al. (2020). Analiz zastosuvannia uhrupovannia povitriano-kosmichnykh syl Rosiiskoi Federatsii u Syriiskii Arabskii Respublitsi [Analysis of the use of the air and space forces of the Russian Federation in the Syrian Arab Republic]. *Zb. nauk. prats Kharkivskoho nats. un-tu Povitrianykh Syl [Coll. of science works of the Kharkiv National Air Force University]*, 4 (66), 7–18. doi: [10.30748/zhups.2020.66.01](https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.01) [in Ukrainian].
15. Bieliesskov, M. (2021). *Suchasnyi rosiiskyi sposib vedennia viiny: teoretychni osnovy i praktychne napovnennia. Analitychna dopovid [The modern Russian way of waging war: theoretical foundations and practical content. Analytical report]*. Kyiv [in Ukrainian].
16. Vyshnevskiy, S. D., Beilis, L. V., Klymchenko, V. Y. (2017). Potentsiini mozhyvosti RLS RTV z vyjavlennia operatyvno-taktychnykh ta taktychnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ [Potential capabilities of RTV radar for detection of operational-tactical and tactical unmanned aerial vehicles]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]*, 2, 92–98. doi: [10.30748/nitps.2017.27.18](https://doi.org/10.30748/nitps.2017.27.18) [in Ukrainian].
17. *Latest Defence Intelligence update on the situation in Ukraine*. (May 21, 2022). Ministry of Defence, United Kingdom government organization. Retrieved from [https://twitter.com/DefenceHQ/status/1527888361763000321?ref\\_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1527888361763000321%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1\\_&ref\\_url=https%3A%2F%2Ftsn.ua%2Fato%2Frosiya-vtrachaye-bezpilotniki-ce-negativno-vpline-na-yiyi-operativnu-efektivnist-u-viyni-britanska-rozvidka-2067400.html](https://twitter.com/DefenceHQ/status/1527888361763000321?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1527888361763000321%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1_&ref_url=https%3A%2F%2Ftsn.ua%2Fato%2Frosiya-vtrachaye-bezpilotniki-ce-negativno-vpline-na-yiyi-operativnu-efektivnist-u-viyni-britanska-rozvidka-2067400.html)

18. Nekrasov, V. (n.d.). Orlany zdes' – kak pchely, eto nash glavnyi vrag. Soosnovatel' Aerorazvedki Iaroslav Gonchar o voine dronov [Eagles here are like bees, they are our main enemy. Aerial reconnaissance co-founder Yaroslav Gonchar about the war of drones]. Retrieved from <https://www.epravda.com.ua/rus/publications/2022/04/30/686413/> [in Russian].

**V. A. Tarshyn, Z. S. Zalevsky, O. V. Ochkurenko, R. L. Stovba**

**FEATURES OF THE DETECTION OF OPERATIONAL TACTICAL UAVS BY RADIOLOCATORS OF THE RADIO ENGINEERING TROOPS**

*The range of aircraft is expanding rapidly and it should currently include objects from hypersonic aircraft to small unmanned aerial vehicles. Accordingly, airspace control must be carried out on all types of aircraft. The article discusses the features of radar detection of very complex objects for active location - unmanned aerial vehicles of tactical and operative-tactical level. Their tactical and technical characteristics, design features and tactics of application allow such aircraft to perform combat missions sometimes without detection of the enemy's air defense system. The article discusses the factors and features that contribute to the untimely detection of objects such as unmanned aerial vehicles by radar stations of radio troops or lead to difficulties in their observation. Ways to improve radar surveillance of unmanned aerial vehicles are noted. The analysis of the experience of combat use of unmanned aerial vehicles in the area of the Joint Forces operation is carried out in the east of Ukraine in 2014–2022 the Syrian military conflict, the second Karabakh war of 2020 and the modern Russian-Ukrainian war. There are more important factors that contributed to the effective use of unmanned aerial vehicles. The generalized information of change of features of the military conflicts which were formed thanks to possibilities of unmanned aerial vehicles is resulted. It is shown that modern reconnaissance and combat capabilities of unmanned aerial vehicles are rapidly changing not only the tactics of using weapons and military equipment of the Armed Forces, but also changing the strategy of warfare. Much attention is paid to the analysis of the mass use of unmanned aerial vehicles of various types in the current Russian-Ukrainian military conflict.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, low-visibility detection, passive interference, radio technical troops.*

О. Ф. Дубина, О. В. Андреев, Т. М. Нікітчук, І. В. Пулеко, С. С. Гаценко,  
В. В. Клязника

## СИНТЕЗУВАННЯ АПЕРТУРИ АНТЕНИ ЗА СИГНАЛАМИ НАЗЕМНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ З КОСМІЧНОГО НОСІЯ

На сьогоднішній день одним із пріоритетних напрямків аерокосмічної галузі України є створення ефективної аерокосмічної розвідки. Дистанційне зондування Землі в оптичному діапазоні надає можливість отримувати знімки земної поверхні для використання їх у військовій сфері, народному господарстві. Для цього застосовують різноманітні датчики, які, як правило, реєструють випромінювання, відбите від поверхні Землі й об'єктів, розташованих на ній. Огляд земної поверхні з космічних апаратів у радіодіапазоні дозволяє вирішувати широке коло завдань. При цьому антена опромінює земну поверхню радіосигналом із відомими параметрами і приймає відбитий від поверхні сигнал на порівняно великій ділянці траєкторії руху носія. З метою бокового огляду земної поверхні для підвищення кутового розділення за шляховою дальністю набув широкого використання штучний синтез апертури антени. Штучне синтезування апертури антени здійснюється на етапі когерентної або некогерентної обробки відбитого сигналу на певній ділянці траєкторії руху носія. При цьому параметри опорного траєкторного сигналу вважаються відомими з точністю до випадкової фази. На відміну від класичних активних методів синтезу апертури антени, які передбачають наявність інформації про параметри сигналу, що випромінюється, для пасивного методу параметри прийнятого сигналу визначаються типом джерела радіовипромінювання, тобто вони є апріорно невідомими. За пасивного синтезування апертури антени за сигналами наземних радіолокаційних станцій як максимально можливий розмір синтезованої апертури, так й умови однозначності визначення азимутального напрямку на джерело радіовипромінювання залежать від параметрів сигналу, що випромінює радіолокаційна станція. У статті проаналізовано параметри орбіти космічного апарата, за яких забезпечується виконання умови однозначності визначення азимутального напрямку на джерело радіовипромінювання та обчислюється роздільна здатність за шляховою дальністю при пасивному синтезуванні апертури антени за сигналами типових радіолокаційних станцій, що працюють в імпульсному режимі.

**Ключові слова:** джерело радіовипромінювання; космічний апарат; роздільна здатність; синтезування апертури антени.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** На сьогоднішній день одним із пріоритетних напрямків аерокосмічної галузі України є створення ефективної аерокосмічної розвідки [1]. Концепція Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021–2025 роки передбачає використання космічної інформації, зокрема, для забезпечення реалізації інтересів держави у сфері національної

© О. Ф. Дубина, О. В. Андреев, Т. М. Нікітчук, І. В. Пулеко, С. С. Гаценко, В. В. Клязника, 2022

безпеки та оборони [2]. Огляд земної поверхні з космічних апаратів (КА) у різних діапазонах дозволяє вирішувати широке коло завдань [3]. У радіодіапазоні антена опромінює земну поверхню і приймає відбитий сигнал на порівняно великій ділянці траєкторії руху носія. Принципи побудови бортових радіолокаційних станцій (РЛС), які використовують дану ділянку траєкторії як штучний (синтезований) розкриття антени, що дозволяє істотно збільшити роздільну здатність РЛС за азимутом (шляховою дальністю), розглянуті, наприклад, у [4–6]. Синтезування апертури антени можливо також за сигналами зовнішніх джерел радіовипромінювання (ДРВ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час у літературі аналізується можливість пасивного синтезування апертури антени за сигналами телевізійного мовлення, супутникових систем або джерел радіоастрономічного випромінювання [7–10]. На відміну від класичних активних методів синтезу апертури антени, які передбачають наявність інформації про параметри опорного сигналу, за пасивного методу синтезу параметри прийнятих радіосигналів заздалегідь невідомі. Тому в [11] запропоновано метод визначення дальності до ДРВ, який базується на обчисленні модуля кореляційного інтеграла між траєкторним сигналом, що приймається в процесі руху носія антени відносно ДРВ, розташованого в певній точці земної поверхні, та відповідної опорної функції на інтервалі синтезування.

Особливостями пасивного синтезування апертури антени (ПСАА) за сигналами наземних РЛС є те, що параметри синтезованої апертури залежать від довжини хвилі й періоду слідування імпульсів, які визначаються характеристиками цих РЛС. Отже, вигляд тіла невизначеності траєкторного сигналу, яке безпосередньо впливає на можливість однозначного виміру азимутального напрямку на ДРВ, суттєво залежить від параметрів сигналу, що випромінює РЛС [6, 12]. При цьому оцінка можливості забезпечення умови однозначності вимірів за азимутом за ПСАА для імпульсного режиму роботи РЛС в [11] не проводилася.

**Формулювання завдання дослідження.** У статті проведено аналіз можливості виконання умов однозначного виміру азимутального напрямку на ДРВ в разі ПСАА за сигналами типових імпульсних РЛС. **Метою** статті є аналіз і вибір параметрів орбіти КА, за яких забезпечується виконання умови однозначності визначення азимутального напрямку на ДРВ та обчислення роздільної здатності за шляховою дальністю радіолокатора з ПСАА за сигналами типових РЛС.

**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення високої роздільної здатності за похилою дальністю більшість РЛС використовують імпульсні зондувальні сигнали [13, 14]. Оскільки радіоімпульси мають період слідування  $T_{II}$ , то РЛС, що розташовується в точці А (0, у, 0) земної поверхні (рис. 1), створює на вході приймача траєкторний сигнал, який має вигляд послідовності радіоімпульсів з періодом слідування  $T_{II}$ .

У радіодіапазоні довжина відрізка шляху носія, протягом якого приймається сигнал, залежить від висоти КА  $H$ , ширини діаграми спрямованості (ДС) бортової антени  $\Theta_a$  і кута відхилення її осі від надира  $\gamma$ , тобто  $X_0 \approx R \cdot \Theta_a$  [6].

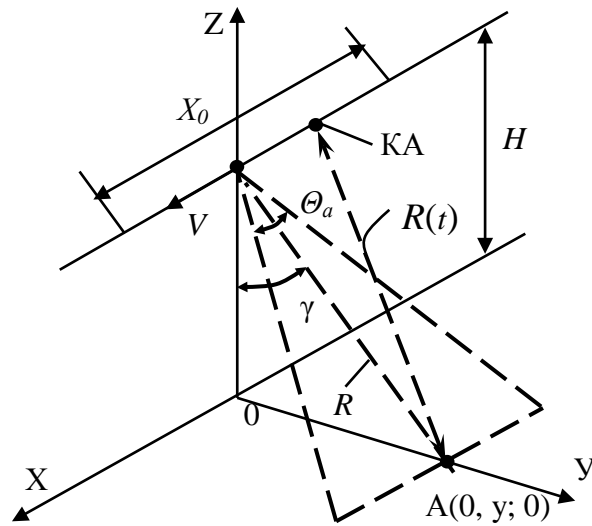


Рис. 1

Якщо КА рухається зі швидкістю  $V$ , то затримка радіосигналу за розповсюдження від ДРВ до входу приймача визначається таким чином:

$$\tau = \frac{R(t)}{c}; \quad R(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2 + H^2},$$

де  $x(t) = V \cdot t$  – поточна координата носія уздовж осі X;

$c$  – швидкість світла.

Якщо РЛС випромінює сигнал довжиною хвилі  $\lambda$ , то, згідно з [5], однозначність вимірів за азимутом буде забезпечена в тому випадку, коли лінійний розмір ДС бортової антени  $X_0 = \lambda R / d_a$  (див. рис. 2) буде меншим, ніж відстань між сусідніми максимумами ДС синтезованої антени  $\lambda R / (VT_H)$ , тобто

$$\lambda R / (VT_H) \geq \lambda R / d_a. \quad (1)$$

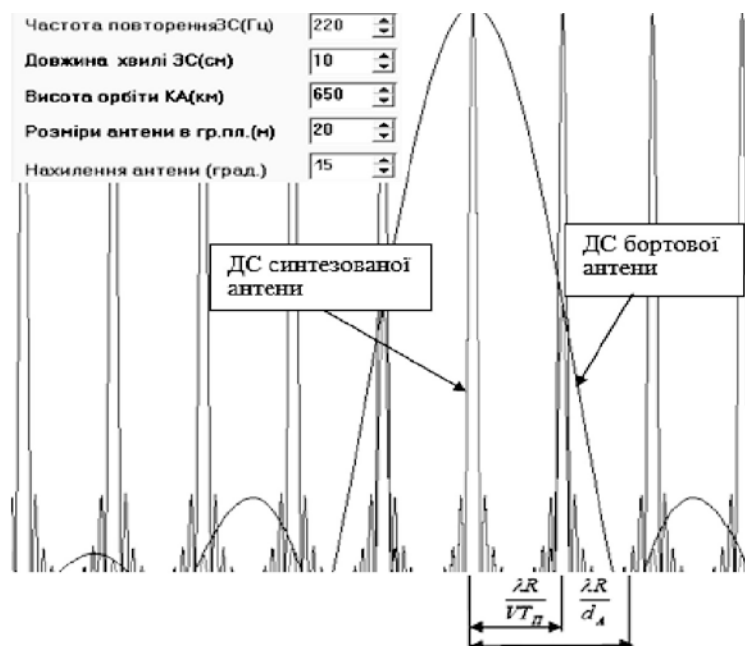


Рис. 2

Тому в разі зміни періоду слідування імпульсів РЛС умови однозначності вимірів за шляховою дальністю також будуть змінюватися. Виконання умови (1) вимагає, щоб розмір реальної бортової антени  $d_a$  був не меншим, ніж відстань, яку проходить КА за період слідування імпульсів РЛС:

$$d_a \geq VT_{II}. \quad (2)$$

Отже, розмір реальної бортової антени та висота польоту КА повинні бути підібрані таким чином, щоб за ПСАА було б можливо визначати місцеположення цілої низки РЛС із забезпеченням умови однозначності вимірів за азимутом. Тобто в процесі моделювання з метою визначення можливості практичного використання ПСАА можна обирати лише розмір реальної бортової антени та висоту польоту КА.

Як типові ДРВ розглянемо наземні РЛС протиповітряної оборони, тактико-технічні характеристики яких наведені в [13]. Аналіз характеристик РЛС показав, що вони можуть бути поєднані в групи відповідно до робочої довжини хвилі, на кожній з яких можлива зміна частоти слідування імпульсів  $F_{II}$ . Більшість засобів працюють з довжиною хвилі 23 см ( $F_{II} = 180$  Гц, 200 Гц, 220 Гц, 270 Гц, 360 Гц, 400 Гц, 680 Гц), 10 см ( $F_{II} = 200$  Гц, 220 Гц, 223 Гц, 250 Гц, 300 Гц, 323 Гц, 330 Гц, 400 Гц, 1000 Гц), 5 см ( $F_{II} = 330$  Гц) та 19 см ( $F_{II} = 250$  Гц).

Перевіримо шляхом моделювання можливість забезпечення умови однозначності вимірів за азимутом за ПСАА для групи РЛС, що випромінюють сигнал з довжиною хвилі 10 см, для різних значень частот слідування імпульсів, у разі руху КА навколо Землі коловою орбітою з висотою 650 км, що відповідає умовам моделювання, яке проводилося в [11].

Відомо, що швидкість руху КА залежить від висоти орбіти і визначається згідно з таким виразом [12]:

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R_z + H}}, \quad (3)$$

де  $G$  – гравітаційна стала;

$M$  – маса Землі;

$R_z$  – радіус Землі.

Розрахунки проведені відповідно до рівняння (3) показують, що швидкість КА, який рухається навколо Землі коловою орбітою з висотою 650 км, дорівнює 7,5 км/с. Тоді для максимальної частоти слідування імпульсів РЛС, яка дорівнює 1000 Гц, розмір реальної бортової антени повинен, згідно з (2), бути не меншим ніж 7,5 м. Вигляд ДС реальної бортової антени з розміром 8 м та ДС ПСАА, що були отримані шляхом моделювання, наведено на рис. 3. Як видно, для даного випадку виконуються умови однозначності вимірів за азимутом. У той же час, аналізуючи рис. 2, на якому наведено результати моделювання для частоти слідування імпульсів РЛС 220 Гц, можна зробити висновок, що умови однозначності вимірів за азимутом не виконуються навіть за використання бортової антени з розміром 20 м.



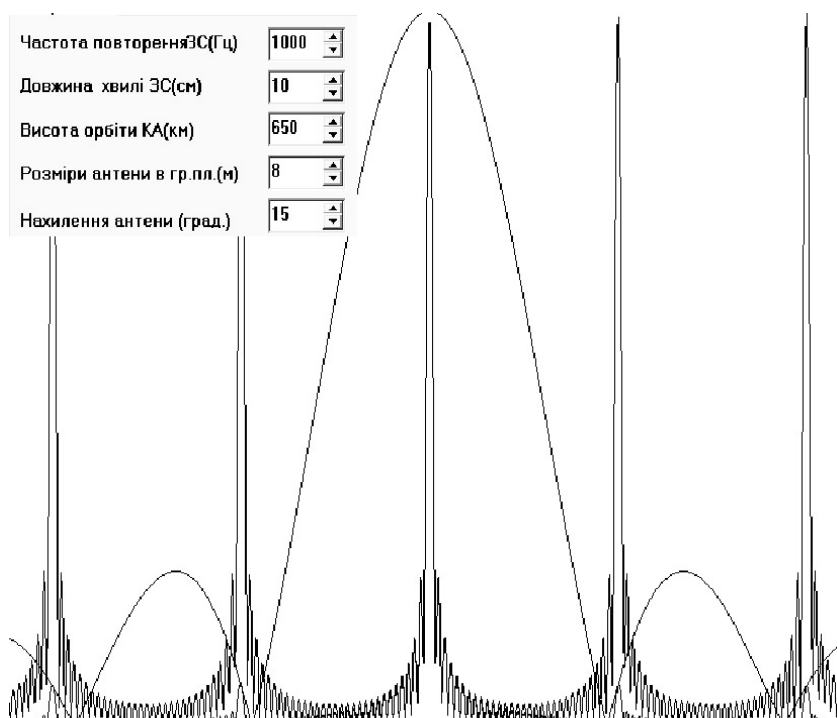


Рис. 3

Досягти виконання умови (2) для даного випадку можливо через зменшення швидкості руху КА шляхом збільшення висоти його орбіти. Якщо припустити, що розмір бортової антени не повинен перевищувати 20 м, то для частоти слідування імпульсів РЛС 220 Гц швидкість руху КА не повинна перевищувати 4,4 км/с, що, згідно з рівнянням (3), відповідає висоті орбіти КА 14200 км.

Отже, для визначення параметрів радіолокатора з ПСАА будемо вважати, що КА рухається навколо Землі коловою орбітою з висотою 14200 км з нахилом орбіти  $45^\circ$ , а РЛС використовує зондувальний сигнал із частотою слідування імпульсів 220 Гц та здійснює коловий огляд простору зі швидкістю 8 об/хв ( $T_{об} = 7,5$  с) за ширини ДС антени в азимутальній площині  $1,3^\circ$  та  $30^\circ$  – у кутомісній [13].

Визначення можливості здійснення ПСАА за сигналами наземних РЛС можна провести відповідно до такої методики.

1. Розраховуємо час, протягом якого РЛС, розташована на максимальній дальності  $R$  від КА, буде знаходитися в межах ДС бортової антени:

$$\Delta T = \frac{\lambda R}{d_a V}.$$

2. Встановлюємо кількість обертів ДС РЛС за час знаходження в межах ДС бортової антени:

$$N = \frac{\Delta T}{T_{об}}.$$

3. Визначаємо час  $T_c$ , протягом якого на вхід приймача за ПСАА будуть надходити імпульси РЛС за один оберт антени.

4. Розраховуємо кількість імпульсів, які надійдуть на вхід приймача в разі ПСАА за один оберт антени РЛС:

$$N_i = \frac{T_c}{T_{II}}.$$

5. Обчислюємо довжину ПСАА:

$$L_c = T_c V.$$

6. Розраховуємо роздільну здатність радіолокатора з несфокусованою ПСАА за шляховою дальністю на дальній межі смуги огляду:

$$\delta R = \frac{\lambda R}{L_c}.$$

Результати проведених розрахунків за наведеною методикою для РЛС, що випромінюють сигнал з довжиною хвилі  $\lambda = 10$  см та  $\lambda = 23$  см, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків для  $d_a = 20$  м та  $F_{II} = 220$  Гц

Довжина хвилі РЛС, м	Найменування параметра					
	$\Delta T$ , с	$N$	$T_c$ , с	$N_i$	$L_c$ , м	$\delta R$ , км
10	19,8	2,6	0,027	6	119	14,6
23	45,5	6				33,6

Як видно з даних, наведених у табл. 1, синтезування апертури антени відбувається протягом  $T_c = 0,027$  с, що набагато менше часу знаходження РЛС у межах ДС бортової антени  $\Delta T$ , який визначає максимальний час синтезування апертури антени за активного методу синтезу. Отже, враховуючи обмеження на максимальну довжину синтезованої несфокусованої апертури антени [5], здійснити ПСАА можливо лише за кількістю імпульсів  $N_i = 6$ , які надходять на вхід приймача за один оберт антени РЛС, що забезпечує довжину синтезованої апертури антени  $L_c = 119$  м. У свою чергу, роздільна здатність за шляховою дальністю не залежить від розмірів реальної бортової антени, вона буде змінюватись у разі зміни як довжини хвилі РЛС, так і розташування РЛС у межах зони огляду радіолокатора з ПСАА за горизонтальною дальністю. На дальній межі смуги огляду радіолокатора з ПСАА роздільна здатність за шляховою дальністю становить 14,6 км і 33,6 км для довжин хвиль 10 см та 23 см відповідно. При цьому ДС РЛС за час знаходження в межах ДС бортової антени здійснює від 2 до 6 обертів, які також можуть бути використані для повторного ПСАА з метою підвищення надійності та точності виміру кутового напрямку на ДРВ.

Вигляд ДС реальної бортової антени та ДС радіолокатора з ПСАА за шістьма імпульсами РЛС з мінімальною частотою слідування 220 Гц, що були отримані шляхом моделювання, для довжини хвилі 10 см наведено на рис. 4, а для довжини хвилі 23 см – на рис. 5. Аналіз рис. 4–5 показує, що бортова антена з розміром 20 м забезпечує виконання умов однозначності вимірів за азимутом за ПСАА і розміщення на КА з висотою орбіти 14200 км.

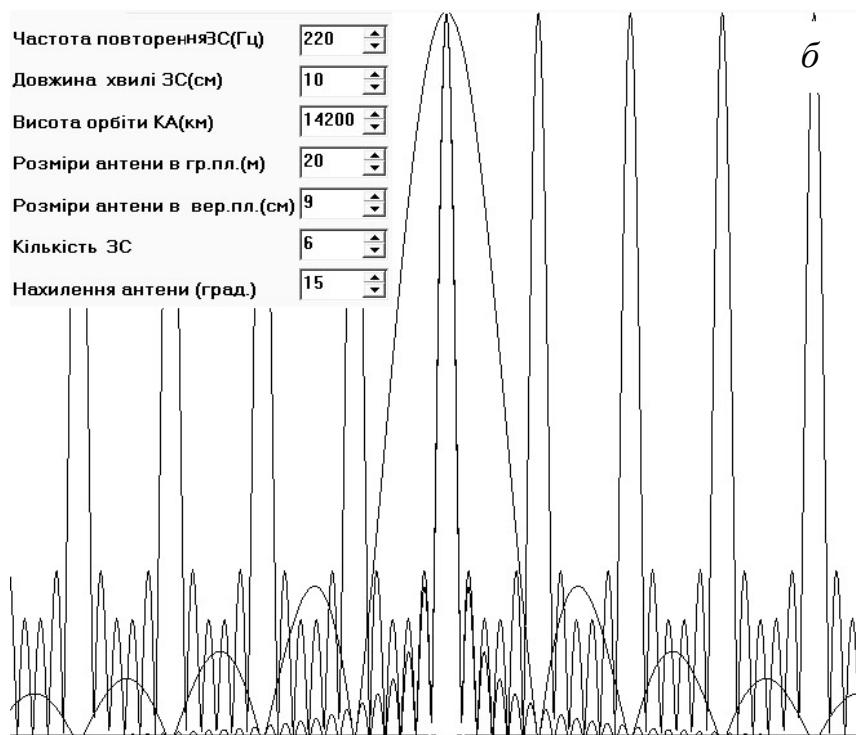


Рис. 4

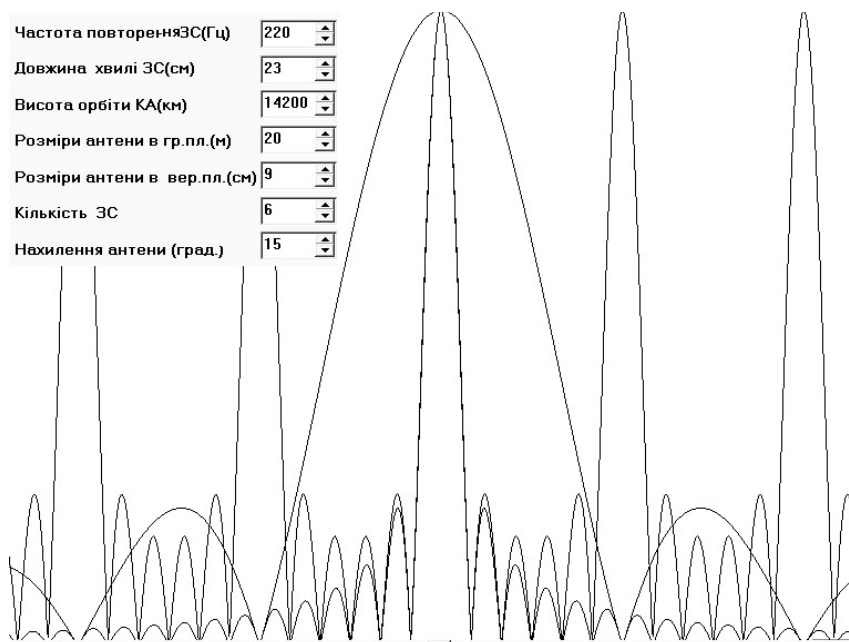


Рис. 5

**Висновки.** Для висоти орбіти КА 14200 км та розміру реальної бортової антени, що не перевищує 20 м, можливо забезпечити виконання умови однозначності визначення азимутального напрямку на ДРВ радіолокатором із ПСАА за сигналами типових РЛС протиповітряної оборони у 83% випадків від загальної кількості РЛС, що підлягали аналізу.

Роздільна здатність за шляховою дальністю радіолокатора з ПСАА залежить як від довжини хвилі ДРВ, так і від його розташування в межах зони огляду радіолокатора з ПСАА за горизонтальною дальністю. Потенційна роздільна здатність за шляховою дальністю радіолокатора з ПСАА обмежується максимальним можливим часом

синтезування, який набагато менше часу знаходження РЛС у межах ДС бортової антени. На дальній межі смуги огляду роздільна здатність за шляховою дальністю радіолокатора з ПСАА становить 14,6 км і 33,6 км для довжин хвиль 10 см та 23 см відповідно.

### **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Мосов С. П. Аерокосмічна розвідка у сучасних військових конфліктах : монографія. Київ : Румб, 2008. 248 с.
2. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021–2025 роки. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npras/pro-shvalennya-konceptsiyi-zagaln-a15r> (дата звернення: 18.06.2022).
3. Визначення точності виміру висот об'єктів при автоматичній обробці стереознімків / О. Ф. Дубина, О. В. Андреев, Т. М. Нікітчук, О. М. Свінцицька // Вісник Нац. техніч. ун-ту України «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2020. Вип. 82. С. 67–73. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.82.67-73>
4. Манойлов В. П., Омельчук В. В., Опанюк В. В. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації. Житомир : ЖДТУ, 2008. 384 с.
5. Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы : учеб. для вузов. Москва, 2008. 592 с.
6. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин и др.; под ред. В. Т. Горяинова. Москва : Радио и связь, 1988. 304 с.
7. Passive Synthetic Aperture Radar Imaging Using Radio-Astronomical Sources / Sean Peters, Mark S. Haynes, Dustin M. Schroeder & Davide Castelletti // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. January 2021. P. (99):1–16. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3050429>
8. Shumskii P. O., Meshcheryakov A. A. & Sharygin G. S. Passive synthesis of the antenna aperture for satellite systems // Russ Phys J. 2012. Vol. 55. P. 277–281. <https://doi.org/10.1007/s11182-012-9807-4>
9. Радиолокатор с синтезированной апертурой, паразитирующий на сигналах телевизионного вещания / А. В. Борисенков, О. В. Горячкин, В. Н. Долгополов и др. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiolokator-s-sintezirovannoy-aperturoy-parazitiruyuschiy-na-signalah-televizionnogo-veschaniya> (дата обращения: 10.06.2022).
10. Нгуен Ван Куан, Маркелова М. А., Веремьев В. И. Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozmozhnosti-ispolzovaniya-sputnikovyh-signalov-podsveta-dlya-passivnoy-radiolokatsionnoy-sistemy> (дата обращения: 10.06.2022).
11. Андреев О. В., Топольницький П. П. Алгоритм пасивного синтезування апертури антени з рухомої платформи // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ ДУТ, 2014. Вип. 9. С. 85–92.
12. Фриз П. В. Основи побудови спеціальних комплексів космічної видової розвідки : підручник. Житомир : Вид-вець О. О. Євенок, 2020. 412 с.
13. Радиоэлектронные средства систем управления ПВО и ВВС : учебник / В. Д. Казаков и др. Москва : Воениздат, 1987. 216 с.

14. Піза Д. М., Семенов Д. С., Бугрова Т. І. Проектування радіолокаційних систем. Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. URL: <https://eir.zntu.edu.ua> (дата звернення: 10.06.2022).

Стаття надійшла до редакції 06.07.2022.

## REFERENCES

1. Mosov, S. P. (2008). *Aerokosmichna rozvidka u suchasnykh viiskovykh konfliktakh [Aerospace intelligence in modern military conflicts]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. *Pro skhvalennia Kontseptsii Zahalnodержavnoi tsilovoi naukovo-tekhnichnoi kosmichnoi prohramy Ukrainy na 2021–2025 roky [On the approval of the Concept of the National targeted scientific and technical space program of Ukraine for 2021–2025]*. (n.d.). Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-koncepciyi-zagaln-a15r> [in Ukrainian].
3. Dubyna, O. F., Andreiev, O. V., Nikitchuk, T. M., & Svintsytska, O. M. (2020). Vyznachennia tochnosti vymiru vysot ob'ektiv pry avtomatychnii obrobtsi stereoznimkiv [Determining the accuracy of measuring the heights of objects during automatic processing of stereo images]. *Visnyk Nats. tekhnich. un-tu Ukrainy «KPI». Serii: Radiotekhnika. Radioaparatabuduvannia [Bulletin of the National technician KPI University of Ukraine. Series: Radio equipment. Radio equipment construction]*, 82, 67–73. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.82.67-73> [in Ukrainian].
4. Manoilov, V. P., Omelchuk, V. V., & Opaniuk, V. V. (2008). *Dystantsiine zonduvannia Zemli iz kosmosu: naukovo-tekhnichni osnovy formuvannia y obrobky vydovoi informatsii [Remote sensing of the Earth from space: scientific and technical basis of formation and processing of species information]*. Zhytomyr [in Ukrainian].
5. Kazarinov, Iu. M. (2008). *Radiotekhnicheskie sistemy [Radio engineering systems]*. Moscow [in Russian].
6. Antipov, V. N., Goriainov, V. T., & Kulin, A. N. et al. (1988). *Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury anteny [Radar stations with digital antenna aperture synthesis]*. Moscow [in Russian].
7. Sean Peters, Mark S. Haynes, Dustin M. Schroeder & Davide Castelletti. (2021). Passive Synthetic Aperture Radar Imaging Using Radio-Astronomical Sources. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. P. (99):1–16. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3050429>
8. Shumskii, P. O., Meshcheryakov, A. A. & Sharygin, G. S. (2012). Passive synthesis of the antenna aperture for satellite systems. *Russ Phys J.*, 55, 277–281. <https://doi.org/10.1007/s11182-012-9807-4>
9. Borisenkov, A. V., Goriachkin, O. V., & Dolgoplov, V. N. et al. (n.d.). *Radiolokator s sintezirovannoi aperturoi, parazitiruiushchii na signalakh televizionnogo veshchaniia [Synthetic aperture radar that parasitizes television broadcast signals]*. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/radiolokator-s-sintezirovannoy-aperturoy-parazitiruyuschiy-na-signalah-televizionnogo-veschaniya> [in Russian].
10. Nguen Van Kuan, Markelova, M. A., & Verem'ev, V. I. (n.d.). *Analiz vozmozhnosti ispol'zovaniia sputnikovykh signalov podsveta dlia passivnoi radiolokatsionnoi sistemy [Analysis of the possibility of using satellite illumination signals for a passive radar system]*. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozmozhnosti-ispolzovaniya-sputnikovykh-signalov-podsveta-dlya-passivnoy-radiolokatsionnoy-sistemy> [in Russian].

11. Andreiev, O. V., Topolnytskyi, P. P. (2014). Alhorytm pasyvnoho syntezyuvannia apertury anteny z rukhomoi platformy [Algorithm of passive synthesis of antenna aperture from a moving platform]. 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 Zhytomy rMilitary Institute], 9, 85–92. Zhytomyr: ZhMI DUT [in Ukrainian].
12. Fryz, P. V. (2020). *Osnovy pobudovy spetsialnykh kompleksiv kosmichnoi vydovoi rozvidky* [Basics of building special space intelligence complexes]. Zhytomyr [in Ukrainian].
13. Kazakov, V. D. et al. (1987). *Radioelektronnye sredstva sistem upravleniia PVO i VVS* [Radioelectronic means of air defense and air force control systems]. Moscow [in Russian].
14. Piza, D. M., Semenov, D. S., & Buhrova, T. I. (2017). *Proektuvannia radiolokatsiinykh system* [Design of radar systems]. Retrieved from <https://eir.zntu.edu.ua> [in Ukrainian].

**O. F. Dubyna, O. V. Andreiev, T. M. Nikitchuk, I. V. Puleko, S. S. Hatsenko, V. V. Kliaznyka**

### **SYNTHESIZING THE ANTENNA APERTURE USING SIGNALS FROM GROUND-BASED RADAR STATIONS FROM A SPACE CARRIER**

*Today, one of the priority directions of the aerospace industry of Ukraine is the creation of effective aerospace intelligence. Remote sensing of the Earth in the optical range provides the opportunity to obtain images of the Earth's surface for use in the military sphere and the national economy. For this, various sensors are used, which, as a rule, register radiation reflected from the surface of the Earth and objects located on it. Surveying the Earth's surface from space vehicles in the radio range allows solving a wide range of tasks. At the same time, the antenna irradiates the earth's surface with a radio signal with known parameters and receives the signal reflected from the surface over a relatively large area of the carrier's trajectory. When using a side view of the earth's surface to increase the angular separation by the path range, the artificial synthesis of the antenna aperture has become widely used. Artificially synthesizing the antenna aperture is carried out at the stage of coherent or incoherent processing of the reflected signal on a certain section of the carrier's trajectory. At the same time, the parameters of the reference trajectory signal are considered to be known with accuracy to the random phase. In contrast to the classical active methods of antenna aperture synthesis, which require the availability of information about the parameters of the radiated signal, with the passive method of antenna aperture synthesis, the parameters of the received signal are determined by the type of radio radiation source and are a priori unknown. When passively synthesizing the antenna aperture based on ground radar signals, both the maximum possible size of the synthesized aperture and the conditions for determining the azimuthal direction to the source of radio radiation depend on the parameters of the signal emitted by the radar. The paper analyzes the orbit parameters of the spacecraft, which ensure the fulfillment of the condition of the unambiguity of the determination of the azimuthal direction to the source of radio radiation and determine the resolution in terms of the path range during the passive synthesis of the antenna aperture based on the signals of typical radars operating in the pulse mode.*

**Keywords:** spacecraft; source of radio emission; resolution; antenna synthesized aperture.

**В. М. Ярмолюк, В. В. Бачинський, О. В. Люлька, О. О. Горошко, О. В. Марченко**

## **КОНЦЕПЦІЯ МОДУЛЬНИХ ТРЕНАЖЕРНИХ СИСТЕМ ІЗ МОЖЛИВІСТЮ ШВИДКОЇ ЗМІНИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

*У дослідженні розглянуто концепцію побудови тренажерних систем транспортних засобів на основі теоретичного обґрунтування, створення й побудови технічних систем за модульними принципами. Сучасний погляд на процес розробки тренажерних систем базується на засадах суворої відповідності кожного об'єкта імітації своїй цілеспрямовано створеній тренажерній системі. Використання модульних принципів при цьому дозволяє розв'язувати задачі щодо підвищення їх ефективності та надійності. Такий підхід відповідає концепції створення універсальних, адаптивних тренажерних систем: обмеженій кількості тренажерних систем – максимальну кількість об'єктів імітації. Новизна запропонованої концепції полягає в тому, що за наявності модулів можлива швидка зміна функціонального призначення системи, при цьому значно зменшується кількість її модифікацій. Науково-технічний прогрес, розвиток сучасної техніки й технологій у переважній більшості здійснюються за принципом модульного створення різних технічних пристроїв, які суттєво відрізняються один від одного за принципом дії, фізичними параметрами й використанням за призначенням. Модуль “Тренажер” може бути реалізований за будь-яким конструктивним рішенням та складатися з таких елементів: нерухомої опори; каркаса; поворотального, підіймального та урівноважувального механізмів; поворотального механізму кабіни, який є елементом сполучення із модулем “Кабіна” через універсальну основу. Застосування принципу модульної побудови в тренажерній техніці дозволить створити єдину систему побудови тренажерів, що, у свою чергу, надасть можливість установити єдині вимоги до тренажерних комплексів та методів їх оцінювання й порівняння. Запропонований модульний підхід до побудови тренажерів визначить максимальний економічний і технічний результати реалізації тренажерної техніки.*

**Ключові слова:** модульний принцип; динамічна платформа; тренажер; тренажерна підготовка; інформаційна підсистема.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Головною проблемою в загальному вигляді є використання модульного принципу в ході створення як окремих об'єктів, так й інтегрованих технічних систем для скорочення терміну їх проєктування, зменшення коштів на виготовлення й експлуатацію. Об'єкти та системи, створені за модульним принципом, швидко реконструюються, модернізуються й відновлюються, завдяки чому мають великі терміни служби, практично не піддаються моральному старінню.

Наукове завдання полягає в обґрунтуванні доцільності використання концепції модульної побудови для створення універсальних тренажерних систем військового призначення. Розробка низки модульних тренажерних засобів свідчить про наукову новизну, що підтверджує істинність вибраної концепції.

© В. М. Ярмолюк, В. В. Бачинський, О. В. Люлька, О. О. Горошко, О. В. Марченко, 2022

Порушена проблема практично розв'язана для модульного конструювання радіоелектронних виробів і систем [2] та в будівництві й архітектурі. Принципове обґрунтування використання модульного підходу до конструювання радіоелектронної апаратури базується на забезпеченні максимальної просторової інтеграції окремих модулів, яка визначається як найщільніша просторова упаковка. З аналізу природних систем відомо, що найщільніша природна упаковка притаманна найбільш упорядкованим у просторі об'єктам із кристалічними структурами [7].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблемними питаннями застосування тренажерів, тренажерних систем та їх комплексів у сучасній системі підготовки механіків-водіїв займається низка вчених. Так, Матвієвський О. М., Руснак І. С., Биличенко В. В., Шворов С. А. особливу увагу звертають на необхідність термінових заходів щодо розробки та впровадження в навчальний процес тренажерних засобів [3, 5, 10, 14], здатних забезпечити високий ступінь імітації роботи не лише механіка-водія, а й екіпажу машини в цілому. Вони також звертають увагу на необхідність інтегрування окремих тренажерів та тренажерних комплексів у єдину навчально-тренувальну систему бойової підготовки Збройних Сил України з урахуванням модульних принципів.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є виявлення й аналіз можливостей та шляхів побудови тренажерних систем за модульним принципом; встановлення характерних властивостей і переваг тренажерних систем, побудованих за модульним принципом; визначення поняття «модуль»; дослідження основи модульної побудови тренажерів.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі [1] розглянуто основні принципи створення та розвитку модульних технічних систем, проте відсутні рекомендації щодо їх застосування для розробки тренажерних систем. У [5] надано рекомендації зі створення нових засобів тренажерних систем, проте вони не відповідають концепції модульної побудови. З викладеного випливає, що обґрунтування концепції модульної побудови тренажерних систем є й досі не вирішеним завданням.

Поняття «модуль» на теперішній час найбільше поширено та активно використовується в будівництві й архітектурі. Під ним розуміють умовну одиницю або вихідну міру для вираження кратних співвідношень і координації розмірів частин споруд та їх елементів. Такі розмірні модулі для конструкції будівництва закріплені відповідними вітчизняними й закордонними стандартами [2].

Поняття про технічний модуль як про повністю готовий до роботи, створений елемент, який може бути конструктивною, функціональною, метричною, інформаційною одиницею в проектуванні, виготовленні, експлуатації, а також для порівняння виробів, ідентифікує модулі як окремі блоки, деталі й вузли машин і приборів, функціональні елементи програм та інші елементи об'єктів, створених за аналогією до виражених структурних властивостей [2].

Технологія виготовлення модулів визначає високий ступінь автоматизації усіх етапів виробництва, включаючи контроль працездатності та налаштування кожного з модулів окремо. Це забезпечує їх постійну готовність до швидкого використання в системі та подальшого функціонування без додаткових регулювань і припасувань.



У ході дослідження радіоелектронного устаткування з'ясовано, що система його модульної побудови складається з подібних рівнів ієрархії [2];

модулі першого компонованого рівня у вигляді мікробірок і мікросхем у безкорпусному й корпусному виконанні;

модулі другого компонованого рівня є функціональними чарунками, які складаються з декількох мікробірок чи мікросхем шляхом їх розміщення та об'єднання на одній друкованій платі;

третьій рівень модульного формування створений у вигляді компактних блоків, функціональних чарунок другого рівня шляхом їх об'єднання в пакети, касети, інші конструктивні елементи;

багатоблочні комплексні модулі четвертого рівня складаються з об'єднаних комплектних модулів третього рівня на основі постав, рам, шаф тощо.

Безумовно, перехід до універсалізації та подальшої стандартизації конструктивних схем технічного устаткування й апаратури за модульним принципом актуальний практично для всіх технічних галузей. Чим вище рівень модульності системи, тим вище загальний технічний рівень виробів і комплексів, із яких дана система складається. Якщо перенести висновки модульного конструювання систем мікроелектроніки на інші галузі техніки, наприклад, машинобудування, то ми бачимо, що через об'єктивні й суб'єктивні причини процес втілення модульних принципів конструювання ще не набув рівня інтенсивного розвитку. Рівень технічного виробництва у багатьох галузях не відповідає сучасним потребам використання модульних методів радіоелектронної техніки, тобто такому технічному розвитку, для якого характерний максимальний прогрес.

Однією з причин, через які модульні принципи, що використовуються в радіоелектронній техніці, не спрацьовують у машинобудуванні та інших галузях, може бути те, що кожна реалізована система або комплекс у своєму складі має різноманітні за призначенням та складом блоки, агрегати, вузли, деталі, до складу яких, у свою чергу, входить також радіоелектронна апаратура. Вести розмову про кінцеву кількість рівнів із чітко вираженою стандартизованою градацією й розподілом немає сенсу. Як вихід із ситуації, що склалася, пропонуємо градацію ієрархічної структури у зворотному напрямку: від окремих функціональних агрегатів, блоків, вузлів системи або комплексу до блоків, вузлів, механізмів, деталей та їх складових, які, у свою чергу, будуть поділятися на модульні складові. В одному випадку функціональна схема елементів системи складатиметься з декількох частин, які вже не поділяються, в іншому – функціональна схема буде містити велику кількість складових модулів, які також матимуть модульні елементи. У такому вигляді модульна система в машинобудуванні реалізує своє призначення з реконструкції, удосконалення, модернізації, ремонту та обслуговування.

Невирішеними проблемами під час побудови тренажерних систем є необхідність створення понятійного апарату, підходів до розроблення концепції, принципів утворення та формування таких систем за модульними принципами. Але, як відзначено в монографії [1], загальний погляд на проблему створення технічних систем за модульним принципом поки ще не визначений. Поняття «модуль» для технічних систем ще тільки формується. У кожній галузі техніки спеціалісти дотримуються своїх визначених правил і понять у роботі та побудові, оцінці та порівнянні технічних систем із модульними властивостями.

Навіть немає загально визнаних понять «технічний модуль», «модульна технічна система», «модульна система».

Особливістю модульного принципу є можливість побудови технічних систем у суворій підпорядкованості розмірів проєктному модулю (модулям) та (або) забезпечення спроможності комплектування різноманітних складних нестандартних технічних систем із великими відмінностями характеристик із невеликої, економічно обґрунтованої кількості типів і типорозмірів однакових первинних (типових чи стандартних) загальних модуль-елементів [1].

Технічний модуль – це елемент (міра) взаємозв'язку, втілення, взаємоузгодження, побудови, ефективного використання, прогресивного розвитку, взаємодії, визначення співвідношень побудови, розробки, організації, реорганізації, еволюції, функціонування, взаємозаміщення, розмноження, об'єднання (перетину), кількісної зміни (заміни) у певній визначеній системі, у якій він виступає як складова системи відносно до вищих структур і як цілісна відносно нижчих чи рівнозначних структур.

Модульна технічна система – цілеспрямовано організована технічна система з відкритою структурою з наявністю технічних модуль-елементів, у разі зміни яких вона переходить в іншу якість з іншими властивостями або призначенням, при цьому такий перехід може бути неодноразовим.

Модульна система – цілеспрямована організація визначених елементів цілого з відкритою структурою, у разі зміни яких система переходить в іншу якість, з іншими властивостями або призначенням, при цьому такий перехід може бути неодноразовим.

Проведений аналіз та аналогія із процесом створення радіоелектронного устаткування визначає принципову відмінність побудови тренажерної техніки за модульним принципом. Для реалізації цих засад до початку побудови технічної системи насамперед необхідно визначити технічно й ергономічно обґрунтовані основні модуль-елементи, які дадуть поштовх для створення всієї модульної тренажерної системи, встановлення оптимальних зв'язків між ними, максимального врахування факторів впливу на її стан та розвиток. Процес побудови необхідно розглядати в ракурсі ергономічності, сумісності, узгодженості у функціонуванні як окремих модулів, так і технічної системи в цілому.

Концепція модульної побудови техніки базуватиметься на таких принципах:

наявність модуль-елементів (не менше двох), які доповнюють і розширюють функціональні можливості системи та елементів узгодження модулів;

наявність зв'язків, за яких модуль-елементи упорядковують технічну систему за певною закономірністю;

взаємність модуль-елементів у технічній системі;

відкритість системи для її розвитку й появи нових модуль-елементів;

можливості модуль-елементів існувати самостійно, тобто без зв'язку із системою, або використання їх в інших системах:

можливості трансформації модуль-елементів без значної зміни всієї системи чи елементів узгодження модулів.

За особливостями побудови модульна технічна система буде:

ієрархічною, коли усі модулі підпорядковуються головному, при цьому вона може бути однорідною або розгалуженою;

незалежною, коли кожний модуль виконує свої особливі функції для користі всієї системи та не залежить від її стану чи інших модулів;

змішаною(частково ієрархічною, частково незалежною).

У результаті аналізу побудови тренажерів і тренажерних систем на сучасному етапі розвитку можна зробити висновок, що такий підхід не дає можливості реалізувати модульні принципи в повній мірі [4, 5].

Пропонуємо варіант структури модульної тренажерної системи, який ґрунтується на концепції модульної побудови. Тренажерним системам, які створені на модульних принципах притаманні такі властивості:

тренажери (тренажерні системи) є відкритою модульною структурою;

тренажерна система при зміні модулів набуває нових можливостей і якостей;

удосконалення модулів не призводить до внесення значних змін у конструкцію тренажера, у складові модуль-елементів, у частини системи;

оптимізація кількості, покращення якості складових модулів тренажерної системи зумовлює розширення її можливостей, покращення якості в цілому.

Втілення принципу модульної побудови в тренажерній техніці дозволить вирішити широке коло проблем, а саме:

створити єдину систему побудови тренажерів та тренажерної техніки;

безперервно розвивати й удосконалювати елементи системи шляхом модернізації та реконструкції;

розробити єдину систему технології виготовлення, технічного обслуговування, експлуатації;

стандартизувати процес виготовлення, збирання, роботи;

установити єдині вимоги до тренажерних комплексів та методів їх оцінювання й порівняння;

прогнозувати перспективи розвитку тренажерної техніки та тренажерних систем у цілому; відпрацювати єдину методику використання модульних тренажерних систем за призначенням.

Розглядаючи типову схему тренажерної системи або комплексу можна умовно поділити їх на кінцеву кількість таких модуль-елементів: електромеханічна конструкція – модуль «Тренажер»; кабіна оператора – модуль «Кабіна»; електронно-обчислювальна машина – модуль «ЕОМ».

Реалізація електронно-обчислювальної машини як модуля вже сталася, це ми бачимо на прикладі сучасного стану розвитку електронно-обчислювальної техніки, яка легко удосконалюється, модернізується, ремонтується, тому в подальшому не розглядатиметься.

Модуль «Тренажер» може бути представлений будь-яким конструктивним рішенням та складатися: з нерухомої опори; каркаса; поворотального, підйимального та урівноважувального механізмів; поворотального механізму кабіни, який є елементом сполучення із модулем «Кабіна» через універсальну основу. Універсальна основа за елементом з'єднання модуля «Кабіна» із модулем «Тренажер» може розглядатися з нею як одне ціле або, за необхідності розширення функціональних можливостей, сама реалізуватися як модуль. Наповнення модуля «Кабіна» для кожного зразка, що імітується, своє відповідно до необхідності реалізації тих чи інших особливостей об'єкта імітації або

завдань навчання. У такому разі замовник реалізує модуль «Кабіна» за своїми потребами та вимогами до модуля (оператор-водій чи член екіпажу, процес навчання, тренування чи удосконалення майстерності тощо).

Даний модульний підхід до побудови тренажерів визначить максимальний економічний і технічний результат реалізації тренажерної техніки.

Модуль «Кабіна» (наприклад, водія автомобільного транспорту) відповідно до модульної побудови, у свою чергу, може складатися з окремих змінних модуль-елементів: рульової колонки, дросельного зсуву, педалей гальма, зчеплення, важелів коробки передач, сидіння (на рис. 1 не наведено). Маючи набір указаних модуль-елементів, можливо відтворювати різні види автомобільного транспорту на декількох модулях-кабінах, які будуть у змозі охопити цілий клас марок або моделей машин.

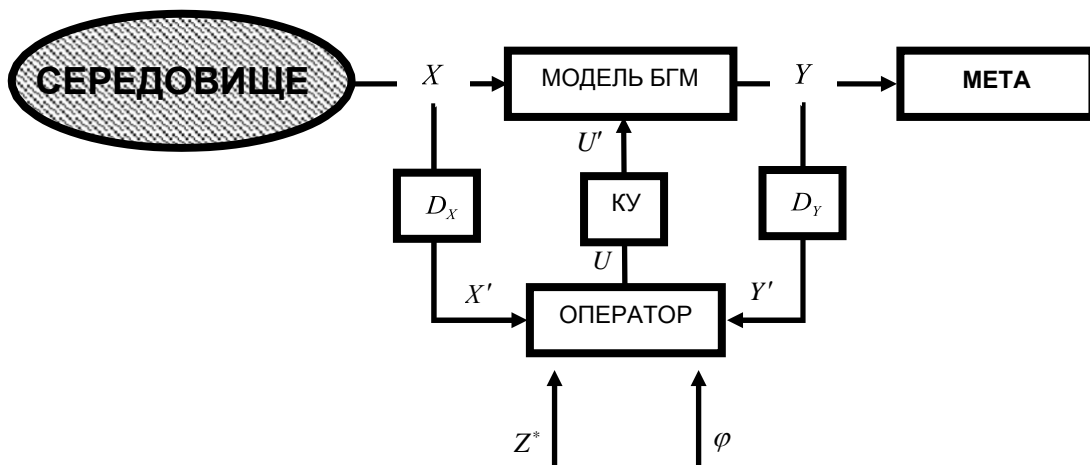


Рис. 1. Блок-схема керування машиною, яка імітується

(КУ – канал управління (орган керування бойовою гусеничною машиною – БГМ))

Можливість зміни модулів знижує кількість тренажерів та тренажерних систем, що використовуються, кількість їх модифікацій, оптимізує спроможності щодо розміщення та мобільності. При цьому вартість модульної тренажерної системи буде нижче вартості звичайних тренажерних систем того ж діапазону.

Отже, керування машиною, як перетворювачем змін у стані зовнішнього середовища у зміни її стану, які дозволяють досягти кінцевої мети, повинно привести до такої зміни стану підсистеми, за якої динамічний та інформаційний процеси, які відбуваються усередині підсистеми, поєднуються в одне ціле та зумовлюють когерентні зміни усіх параметрів підсистеми в цілому. Тоді в блок-схемі взаємодії об'єкта та суб'єкта управління необхідно передбачити зв'язок між ними, який відобразить наявність управлінського впливу суб'єкта на об'єкт. Результат обробки оператором вхідних та вихідних даних, які описують стан машини, що імітується, подамо у вигляді рівностей:

$$X' = D_X (X); Y' = D_Y (Y).$$

Сформовану загальну інформаційну модель стану підсистеми «людина – машина – середовище» оператор порівнює із можливим варіантом дій та попередньо сформованою на основі отриманого досвіду концептуальною моделлю керування машиною (сукупністю

уявлень механіка-водія про цілі та завдання керування, можливі стани машини, системи «людина – машина» та способах впливу на них), формує інтегральну оцінку інформаційної моделі, на основі якої приймає рішення про керування:

$$U = \varphi(X', Y', Z^*),$$

де  $\varphi$  – спосіб досягнення часткової мети, отриманий за результатами обробки вхідних та вихідних даних про стан машини як об'єкта керування.

Після обробки вихідних та вхідних даних оператор через органи керування машиною реалізовує прийняте рішення та змінює стан керівного входу  $U'$  об'єкта, тобто застосовує органи керування машиною (рис. 1).

Отже, тренажер БГМ необхідно розглядати як систему зі складною внутрішньою структурою, яку доцільно розділити на дві підсистеми:

динамічну – динамічна платформа тренажера;

інформаційну – оцінки рівня відповідності концептуальної моделі керування машиною очікуваному результату та ступеню досягнення мети.

Обидві підсистеми перебувають у постійній тісній взаємодії між собою та визначають ієрархічну структуру тренажера, яка складається з двох рівнів: динамічного та інформаційно-керувального. Відповідно, для управління такою системою необхідно мати достовірну інформацію про структуру її фазового портрета [17].

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Втілення концепції створення тренажерних систем за модульними принципами сприяє підготовці фахівців різного профілю, надає можливість моделювати різноманітні види техніки та озброєння й у такий спосіб зменшує різноманітність навчальної техніки. Відтворення різних умов застосування зразка, що моделюється, виключає необхідність занять на відповідних зразках бойової техніки в будь-яких погодних умовах та особливостях їх використання (наприклад, водіння в колонах, бездоріжжям, у горах, на воді). З економічної точки зору використання модульного тренажера дозволяє зберегти моторесурси техніки, зразків озброєння, паливно-мастильні й експлуатаційні матеріали, знизити витрати на обслуговування й ремонт, виключити пошкодження складної техніки. При цьому вартість надскладного тренажера завжди буде дешевшою в декілька разів від бойового зразка [4. 6]. Переобладнання тренажерних систем для моделювання інших зразків у короткі терміни дасть можливість багатопрофільної підготовки спеціалістів різних військових спеціальностей та оволодіння ними суміжними військовими спеціальностями. Застосування такого тренажера в центрах підготовки військових спеціалістів або в навчальних закладах полегшить освітній процес, скоротить строк підготовки фахівців, покращить навчальну наочність та підвищить якість підготовки.

## **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Васильєв А. Л. Модульный принцип формирования техники. Москва : Изд-во стандартов, 1989. 240 с.
2. Верхопятницкий П. Д., Латинский В. С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры. Ленинград : Судостроение, 1983. 232 с.

3. Матвієвський О. М. Інтегрування тренажерних технологій як магістральний напрямок вдосконалення навчально-тренувальної бази бойової підготовки військ // Наука і оборона. Київ : Вид-во “Стилос”, 2010. № 2. С. 48–54.
4. Руснак І. С., Шевченко В. Л. Проблеми модернізації та створення тренажно-модельовальних комплексів військового призначення // Наука і оборона. 2002. № 1. С. 32–39.
5. Руснак І. С., Шевченко В. Л., Артемов Ю. І. Методологічні засади створення інтегрованої навчально-тренувальної системи оперативної та бойової підготовки військ // Наука і оборона. 2002. № 2. С. 29–35.
6. Руснак І. С. Інформаційні технології для війська // Народна Армія. 2001. № 219 (2399). С. 1, 3.
7. Шафрановский И. И. Симметрия в природе. Ленинград : Недра, 1985. 166 с.
8. Рудковський О. М. Особливості методики підготовки водія автомобіля з використанням сучасних технологій моделювання з урахуванням його психофізіологічних якостей // Підготовка військових фахівців : Військово-технічний збірник. 2013. № 1 (8). С. 50–51. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.8.2013.107-112>
9. Задорожний І. І., Дорофеев Ю. Ф., Баліцький Н. С. Аналіз існуючої системи підготовки водіїв у Збройних Силах України та пропозиції щодо її вдосконалення // Військово-технічний збірник : підготовка військових фахівців. Львів : НАСВУ. 2018. № 19. С. 73–77. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.19.2018.73-77>
10. Биличенко В. В., Рациборинський В. В. Аналіз підходів до класифікації автотренажерів для підготовки водіїв // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк : ЛНТУ, 2014. № 46. С. 29–37.
11. IEEE Standart for Modeling and Simulation (M&S). High Level Architecture (HLA). IEEE Std. 1516-2000. Institute of Electrical and Electronic Engineers. New York, 2000.
12. Пестерев М. В. Сприйняття переміщень та навантажень на механіка водія бойових гусеничних машин // Міжнар. наук.-практ. конф. “Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи” (Військова академія (м. Одеса), 22.10.2020). Одеса, 2020. С. 98.
13. Oskarsson P., Nählinder S. Training effects in a low fidelity combat vehicle simulator // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society. 2012. <https://doi.org/10.1177/1071181312561312>
14. Шворов С. А., Сілко О. В. Теоретичні питання побудови інтелектуальних тренажерних систем інтенсивної підготовки операторів АСУ військового призначення // Зб. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”. Київ : Вид-во КПІ, 2011. № 1. С. 179–182.
15. Towards an extensible simulator of real motion platforms / Casas S., Alcaraz J. M., Olanda R., Coma I., Fernández M. // Simulat Model Pract Theory. 2014. № 45. P. 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.011>
16. Матвієвський О. М., Герасименко О. В., Щебланін Ю. М. Методичний підхід до обґрунтування характеристик тренажерних засобів і систем // Наука і оборона. 2005. № 1. С. 59–65.
17. Пестерев М. В. Модель тренажера бойової гусеничної машини як елемента інтелектуальної тренажерної системи // Зб. наук. праць Військової академії (м. Одеса). 2020. № 2 (14), Ч. І. С. 92–98. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.92-98>

Стаття надійшла до редакції 06.07.2022.

## REFERENCES

1. Vasil'ev, A. L. (1989). *Modul'nyi printsip formirovaniia tekhniki [Modular principle of technology formation]*. Moscow [in Russian].
2. Verkhopiatnitskii, P. D., & Latinskii, V. S. (1983). *Spravochnik po modul'nomu konstruirovaniuu radioelektronnoi apparatury [Handbook of modular design of electronic equipment]*. Leningrad [in Russian].
3. Matviiievskiy, O. M. (2010). Intehruvannia trenazherykh tekhnolohii yak mahistralnyi napriamok vdoskonalennia navchalno-treivalnoi bazy boiovoi pidhotovky viisk [Integration of training technologies as the main direction of improvement of the educational and training base of combat training of troops]. *Nauka i oborona [Science and Defense]*, 2, 48–54. Kyiv [in Ukrainian].
4. Rusnak, I. S., & Shevchenko, V. L. (2002). Problemy modernizatsii ta stvorennia trenazhno-modelovalnykh kompleksiv viiskovoho pryznachennia [Problems of modernization and creation of military training and simulation complexes]. *Nauka i oborona [Science and Defense]*, 1, 32–39. Kyiv [in Ukrainian].
5. Rusnak, I. S., Shevchenko, V. L., & Artemov, Yu. I. (2002). Metodolohichni zasady stvorennia intehrovanoi navchalno-treivalnoi systemy operatyvnoi ta boiovoi pidhotovky viisk [Methodological principles of creating an integrated educational and training system of operational and combat training of troops]. *Nauka i oborona [Science and Defense]*, 2, 29–35. Kyiv [in Ukrainian].
6. Rusnak, I. S. (2001). Informatsiini tekhnolohii dlia viiska [Information technologies for the army]. *Narodna Armiia [People's Army]*, 219 (2399), 1, 3 [in Ukrainian].
7. Shafranovskii, I. I. (1985). *Simmetriia v prirode [Symmetry in nature]*. Leningrad [in Russian].
8. Rudkovskiy, O. M. (2013). Osoblyvosti metodyky pidhotovky vodiia avtomobilia z vykorystanniam suchasnykh tekhnolohii modeliuvannia z urakhuvanniam yoho psykhoфизиологических качеств [Peculiarities of the method of training a car driver using modern modeling technologies taking into account his psychophysiological qualities]. *Pidhotovka viiskovykh fakhivtsiv : Viiskovo-tekhnichniy zbirnyk [Training of military specialists: Military technical collection]*, 1 (8), 50–51 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.8.2013.107-112>
9. Zadorozhnyi, I. I., Dorofiev, Yu. F., & Balitskyi, N. S. (2018). Analiz isnuiochoi systemy pidhotovky vodiiv u Zbroinykh Sylakh Ukrainy ta propozytsii shchodo yii vdoskonalennia [Analysis of the existing driver training system in the Armed Forces of Ukraine and proposals for its improvement]. *Viiskovo-tekhnichniy zbirnyk : pidhotovka viiskovykh fakhivtsiv [Military technical collection: training of military specialists]*, 19, 73–77. Lviv: Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.19.2018.73-77>
10. Bylychenko, V. V., & Ratsyborynskiy, V. V. (2014). Analiz pidkhodiv do klasyfikatsii avtotrenazheriv dlia pidhotovky vodiiv [Analysis of approaches to the classification of driving

simulators for driver training]. *Mizhvuzivskyi zbirnyk «Naukovi notatky» [Interuniversity collection "Scientific notes"]*, 46, 29–37. Lutsk [in Ukrainian].

11. *IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S). High Level Architecture (HLA). IEEE Std. 1516-2000*. (2000). Institute of Electrical and Electronic Engineers. New York.

12. Pesterev, M. V. (2020). Spryiniattia peremishchen ta navantazhen na mekhanika vodiia boiovykh husenychnykh mashyn [Perception of movements and loads on the mechanic of the driver of combat tracked vehicles]. In *Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Spilni dii viiskovykh formuvan i pravookhoronnykh orhaniv derzhavy: problemy ta perspektyvy" (Viiskova akademiia (m. Odesa), 22.10.2020) [International. science and practice conf. "Joint actions of military formations and law enforcement agencies of the state: problems and prospects" (Military Academy (Odesa), October 22, 2020)*. (P. 98). Odesa [in Ukrainian].

13. Oskarsson, P., & Nählinder, S. (2012). Training effects in a low fidelity combat vehicle simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*. <https://doi.org/10.1177/1071181312561312>

14. Shvorov, S. A., & Silko, O. V. (2011). Teoretychni pytannia pobudovy intelektualnykh trenazherykh system intensyvnoi pidhotovky operatoriv ASU viiskovoho pryznachennia [Theoretical issues of building intelligent training systems for intensive training of military ACS operators]. *Zb. nauk. prats VITI NTUU "KPI" [Collection of Sciences. Proceedings of VITI NTUU "KPI"]*, 1, 179–182. Kyiv [in Ukrainian].

15. Casas, S., Alcaraz, J. M., Olanda, R., Coma, I., & Fernández, M. (2014). Towards an extensible simulator of real motion platforms. *Simulat Model Pract Theory*, 45, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.011>

16. Matviiievskiy, O. M., Herasymenko, O. V., & Shcheblanin, Yu. M. (2005). Metodychnyi pidkhid do obgruntuvannia kharakterystyk trenazherykh zasobiv i system [A methodical approach to substantiating the characteristics of exercise equipment and systems]. *Nauka i oborona [Science and Defense]*, 1, 59–65. Kyiv [in Ukrainian].

17. Pesterev M. V. (2020). Model trenazhera boiovoi husenychnoi mashyny yak elementa intelektualnoi trenazhernoï systemy [A model of a combat tracked vehicle simulator as an element of an intelligent training system]. *Zb. nauk. prats Viiskovoi akademii (m. Odesa) [Collection of Sciences. Proceedings of the Military Academy (Odesa)]*, 2 (14), Vol. 1, 92–98 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.92-98>

**V. M. Yarmoliuk, V. V. Bachynskiy, O. V. Liulka, O. O. Goroshko, V. P. Marchenko**  
**THE CONCEPT OF MODULAR EXERCISE SYSTEMS WITH THE POSSIBILITY OF QUICKLY CHANGING THE FUNCTIONAL PURPOSE**

*In the study, the author considers the concept of building simulator systems of vehicles based on theoretical justification, creation and construction of technical systems according to modular principles. The modern view of the process of creating training systems is based on the principles of strict compliance of each object of imitation to its purposefully created training system. The use of modular principles of creating training systems allows you to solve problems related to increasing their efficiency and reliability. This approach corresponds to the concept of creating universal, adaptive training systems: a limited number of training systems - the maximum number of simulation objects. The concept of modular training systems is a novelty,*



*which is distinguished by the fact that in the presence of modules there is a possibility of quickly changing the functional purpose of the system, while the number of modifications of training systems is significantly reduced. The modern development of scientific and technical progress, modern equipment and technologies in the vast majority is carried out according to the principle of modular creation of various technical devices, which differ significantly from each other in the principle of operation, physical parameters and intended use. The "Trainer" module can be represented by any design solution and consists of a fixed support, a frame, a turning mechanism, a lifting mechanism, a balancing mechanism, a turning mechanism of the cab, which is an element of connection with the "Cabin" module through a universal base. The application of the principle of modular construction in exercise equipment will allow to create a single system of construction of exercise equipment and exercise equipment, which in turn provides an opportunity to establish uniform requirements for exercise complexes and methods of their evaluation and comparison. This modular approach to the construction of simulators will determine the maximum economic and technical result of the implementation of simulator equipment.*

***Keywords:*** *modular principle; operator's cabin; dynamic platform; simulator; simulator training; information subsystem.*

В. В. Бачинський, О. М. Шкурпіт

## ПІДБІР МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Адитивні технології дозволили сформувавши принципово новий напрямок у виробництві безпілотних літальних апаратів, за допомогою якого можна виготовляти одиничні й унікальні зразки виробів за рахунок поступового нарощення матеріалу методом пошарового синтезу з одночасним одержанням заданої форми та розмірів виробу на основі цифрового прототипу. Сучасні можливості обладнання і матеріалів швидко еволюціонують у бік більшого розміру продукції, вищої точності та якості, великих швидкостей друку виробу й низьких витрат. У разі використання традиційних способів виробництва вартість і складність безпілотних літальних апаратів досить висока. Застосування адитивних технологій дозволяє істотно знизити вагу корпусу безпілотників за рахунок скорочення витрат матеріалу.

У статті проведено дослідження властивостей різних полімерів, які застосовуються в адитивному виробництві, визначено їх вплив на якість елементів безпілотного літального апарата, а також започатковано розроблення методики підбору матеріалів для виготовлення його комплектуючих деталей.

Проведені дослідження порушили цілу низку проблемних питань, пов'язаних із необхідністю вдосконалення процесу 3D-друку, організації та управління виготовленням складних елементів безпілотних літальних апаратів, які б дозволили ефективно використовувати новітні адитивні технології 3D-друку в сучасному виробництві в бойових умовах.

За результатами дослідження визначено властивості основних матеріалів для 3D-друку, які використовуються у FDM-технології отримання виробу. Встановлено, що застосування адитивних технологій спричинить коригування принципів конструювання безпілотних літальних апаратів, відпрацювання технологій друку, використання нових стратегій побудови, появу нових, суміжних із 3D-друком технологій. Аналіз механізмів управління якістю розробки деталей безпілотників свідчить, що технологічна схема підбору композиційного матеріалу є важливим елементом для 3D-друку сучасних апаратів та їх комплектуючих.

Передбачено, що з удосконаленням технологічного обладнання і розвитком методів підбору матеріалу для виготовлення елементів безпілотних літальних апаратів напрямок створення нових літальних апаратів за допомогою адитивних технологій буде неухильно розширюватися.

**Ключові слова:** адитивні технології; безпілотний літальний апарат; 3D-друк; полімер; структура.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Друк деталей на 3D-принтері дозволяє не лише друкувати безпосередньо самі безпілотні літальні апарати (БпЛА), а також створювати практично нескінченний резерв запасних елементів для них, що дає

© В. В. Бачинський, О. М. Шкурпіт, 2022

можливість збільшити ефективність тренування оператора та зменшити терміни ремонту регулярних поломок. Крім того, надрукований БпЛА буде простіше лагодити, що дозволить краще відчувати його внутрішню структуру і механіку. 3D-друк дозволяє також швидко розробляти деталі за власним проектом. Так, для відновлення приладів і деталей, наприклад відеокамер, різних датчиків, акумуляторних батарей, які потрібно встановити на БпЛА, адитивні технології дозволяють, використовуючи відповідне програмне забезпечення, роздруковувати будь-яку деталь і проводити її випробування, вносити будь-які зміни шляхом багаторазового друку.

Однак вагомим фактором, який найбільше впливає на властивості надрукованого виробу, звичайно ж, є марка і якість філаменту, особливо властивостей матеріалу в складних умовах експлуатації. Тому, виходячи з викладеного вище, можна стверджувати, що важливим завданням є вивчення алгоритму підбору матеріалу для виготовлення елементів БпЛА за адитивними технологіями.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У сучасних умовах ринок FDM-технологій активно розвивається, проводяться експерименти з друком різноманітними видами філаменту, інтенсивно вдосконалюється програмне забезпечення та процеси 3D-друку. Питанням вибору оптимального технологічного режиму та процесів усадки під час друку, використання різних додаткових елементів та модифікації полімерів дослідники приділяють значну увагу [1–5].

Можливості обладнання і матеріалів швидко еволюціонують у бік збільшення швидкості друку з більш високою якістю та точністю, а також зниженням витрат на виробництво [7-9]. Адитивні технології ідеально підходять для виготовлення, друку, ремонту та модифікації сучасних БпЛА в польових умовах. Це відбувається, тому що сучасний 3D-друк запропонував широку гаму матеріалів з різними властивостями: міцні, еластичні, термостійкі, надлегкі [10-15]. Однак аналіз механізмів управління якістю розробки елементів БпЛА, вибір композиційного матеріалу, процедури забезпечення якості адитивного виробництва їх комплектуючих до кінця ще не визначені.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є дослідження властивостей різних полімерів, які застосовуються в адитивному виробництві, їх впливу на якість елементів БпЛА, а також визначення порядку підбору матеріалів для виготовлення комплектуючих деталей для безпілотників.

**Виклад основного матеріалу.** Адитивне виробництво відіграє важливу роль в індустрії сучасних дронів, пропонуючи нові інноваційні можливості, що створює умови для покращення якості та зниження вартості виробів. Створення легких та надійних деталей стало необхідним для багатьох галузей. Збереження легкої структури допомагає покращити кінцевий продукт, оскільки оптимізація ваги – одна із найчастіших вимог для сучасних БпЛА. Легкі та надійні деталі також є великою перевагою для елементів безпілотників, адже вага має вирішальне значення для літального апарата. Адитивні технології дозволяють впроваджувати інновації щодо дизайну для всіх його частин, що є особливо важливим в умовах сучасної війни.

За результатами проведених досліджень встановлено, що застосування адитивних технологій у польових умовах сприятиме вирішенню таких завдань:

друк БпЛА в бойових умовах (дрони-камікадзе, розвідувальні, транспортні);

ремонт виробів (рама, гвинт, корпус, кронштейн для відеокамери тощо);  
модернізація БпЛА (під конкретне завдання, дальність, час польоту);  
обладнання новими технологіями (нічне бачення, система скидання, транспортний бокс);  
друк допоміжних виробів (стабілізатори для пострілу осколкового гранатометного ВОГ-17, запірні механізми для ручних гранат, корпуси для вибухових речовин тощо).

При цьому БпЛА повинні бути досить легкими, а двигуни, у свою чергу, мають бути достатньо потужними, забезпечуючи виконання поставленого завдання. Тому основною метою виробництва безпілотників є створення легших і надійніших конструкцій. Легкі дрони легко виготовити за допомогою 3D-друку з використанням інноваційних технологій. Застосовуючи, наприклад, ґратчасті конструкції, можна значно зменшити вагу БпЛА. Однак важливим залишається підбір матеріалу та його вплив на якість елементів літального апарата.

Аддитивні технології широко застосовують у сучасній російсько-українській війні. Активно друкують як безпосередньо сам БпЛА (наприклад, «Бандерик»), так і різні додаткові елементи до нього (рис. 1).



Рис. 1. Елементи БпЛА, надруковані на 3D-принтері

Отже, на 3D-принтері можна надрукувати як елементи дрона: каркас, підвіс камери, опорні конструкції, внутрішні корпуси, кріпильні кронштейни, електронні роз'єми, запасні частини, – так і додаткові елементи: стабілізатори для гранат (мін), систем скидання, запірних механізмів, корпуси для вибухових речовин тощо (рис. 2).



Рис. 2. Друк на 3D-принтері стабілізаторів для мін та різних корпусів

У технічних паспортах різних 3D-принтерів подають обмежений перелік їх характеристик, які можна порівнювати, але вони повною мірою не можуть описати якість виробів на виході.

Розробка порядку підбору композиційного матеріалу дозволяє вирішити суперечність визначення того матеріалу, який застосовують в адитивному виробництві, оскільки вибір філамента обмежується технічними характеристиками, зазначеними в паспортах пристроїв, вимогами до виробу та необхідною якістю отриманого елемента БпЛА.

Основні вимоги до вибору філамента для друку комплектуючих безпілотників повинні суворо дотримуватися. Міцність на вигин, міцність на розтягування, твердість полімерного матеріалу мають перевищувати або відповідати числу, вказаному в технічному завданні. Щільність, усадка, водопоглинання полімерного матеріалу не повинні перевищувати (або дорівнювати) відповідному показнику, зазначеному також у технічному завданні.

Нами було визначено шість груп якісних характеристик отриманого елемента для пошуку наближеного за сукупністю властивостей філамента відповідно до вимог технічного завдання (табл. 1, у якій  $V_v$  – це вимоги до виробу).

Таблиця 1

Фізико-механічні показники для вибору філамента

№	Показник	Розмірність	Виконання умови
1	Міцність на вигин ( $V_1$ )	МПа	$V_1 \geq V_v$
2	Міцність на розтягування ( $V_2$ )	МПа	$V_2 \geq V_v$
3	Щільність ( $V_3$ )	г/см <sup>3</sup>	$V_3 \leq V_v$
4	Твердість за Роквелом ( $V_4$ )	Р-шкала	$V_4 \geq V_v$
5	Усадка ( $V_5$ )	%	$V_5 \leq V_v$
6	Вологопоглинання ( $V_6$ )	%	$V_6 \leq V_v$

Під час вибору філамента можливі два варіанти, розглянемо їх.

1. Один або кілька відповідних полімерів. Вибираємо кращий за сукупністю властивостей, виходячи із вимог до виробу.

2. Немає відповідного полімеру. Якщо не дотримуються умови технічного завдання щодо виконання всіх шести вимог, то друк виробу не можливий. У разі виконання хоча б трьох вимог допускається використання полімерного матеріалу для друку виробу, але за дотримання таких обов'язкових двох умов:  $V_3 \leq V_v$ ,  $V_4 \geq V_v$ .

Для виявлення найбільш важливих показників якості елементів БпЛА, виконаних за адитивними технологіями, розроблено процедуру структурування функцій якості. З метою її реалізації виявлено вимоги та якісні характеристики, які в подальшому зіставлені для знаходження зв'язку між ними у матриці сумісності вимог (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця сумісності «вимоги – якісні характеристики» БпЛА

Вимоги	Якісні характеристики					
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
Удароміцність	++	++	+	+++	-	-
Складність деталі	-	-	-	-	++	-
Герметичність	-	-	+	-	-	+
Маса деталі	-	-	+++		+	+
Гладкість поверхні	-	-	-	-	++	-
УФ захист	-	-	-	+	-	-
Швидкість друку	-	-	+	-	+	-

На рис. 3 наведено технологічну схему вибору філаменту для БПЛА.

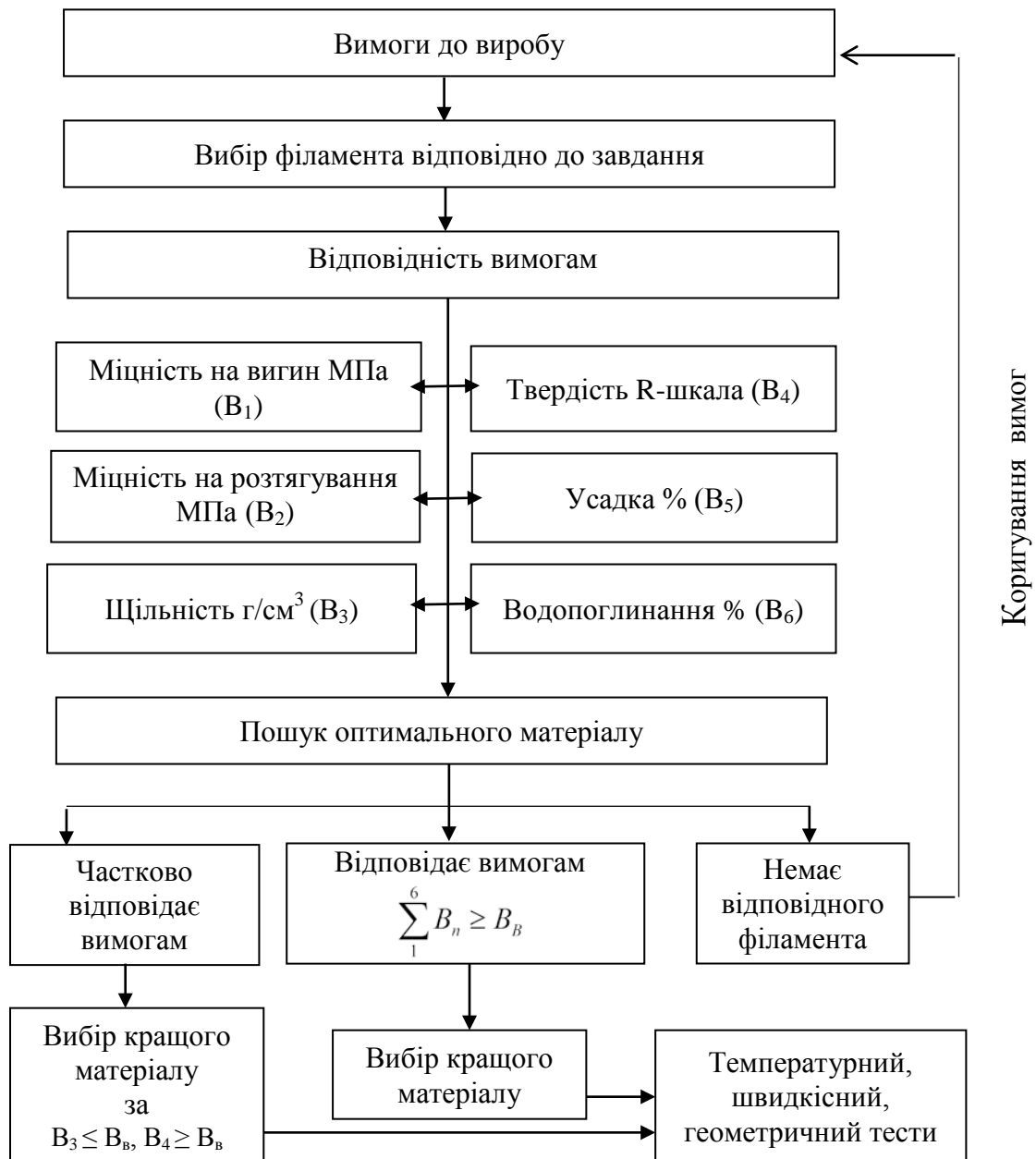


Рис. 3. Технологічна схема вибору матеріалу для БПЛА

Для вибору пластику (філаменту), який найбільш повно задовольняє вимоги до БПЛА, нами було проаналізовано найпоширеніші на території України його види, що мають різні фізико-механічні характеристики. Кожен із досліджених матеріалів вирізняється низкою переваг та недоліків. Для найбільш доцільного вибору філаменту, що відповідає певним технологічним характеристикам, було розроблено спеціальну порівняльну таблицю (табл. 3).

Аналіз отриманих результатів показує, що абсолютно ідеального матеріалу для 3D-друку немає, оскільки кожен має як негативні, так і позитивні характеристики та властивості, тому вибір залежатиме передусім від призначення виробу та умов його експлуатації.

Порівняльна таблиця технічних характеристик пластику за вимогами до виробу

Тип пластику	ABS	PLA	PETG	Nylon	HIPS
Межа міцності та вигин, МПа	41	55,3	76,1	70	37,6
Межа міцності на розрив, МПа	22	57,8	36,5	66-83	16,4
Усадка, %	0,8	0	0	1,2	0,4
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,1	1,25	1,3	1,13	1,05
Твердість за Роквелом	105-110	70-90	106	-	79
Вологопоглинання, %	0,2-0,45	0,2-0,4	0,12	3,1	1

Проаналізувавши дані зведеної таблиці технічних характеристик пластику, можна зробити висновок, що найбільш придатними і технологічно вигідними матеріалами для елементів БпЛА є HIPS, ABS і PETG. Основними характеристиками, які зумовлюють вибір, є: щільність, твердість і вологопоглинання. Вони впливають на такі найважливіші параметри, як: маса літального апарата, герметичність і вологостійкість його корпусу.

Також визначено, що для виготовлення основних елементів БпЛА можна застосовувати HIPS-пластик, оскільки за своїми характеристиками він має найменшу щільність (1,05) за нульового відсотка вологопоглинання. Застосовуючи цей філамент, можна досягти найвигідніших показників маси літального апарата, а також вологопоглинання. У той же час пластик ABS надасть максимальної твердості виробу.

Матеріал PETG також має майже нульовий відсоток вологопоглинання, але для нього характерна найбільша щільність, що може призвести до небажаного обтяження апарата, незважаючи на це, даний вид філаменту відмінно підходить для виготовлення гнучких, сполучних механізмів безпілота.

На цьому етапі проводиться підбір філаменту, що відповідає технічному завданню. Після вибору типу пластику необхідно провести тести, оскільки філамент одного виду, одного й того самого виробника, але різних кольорів або партій за фізико-механічними властивостями може суттєво відрізнятись. Ми рекомендуємо провести такі тести: температурна вежа, тест відкатів, тест герметичності друку.

**Висновки.** Сьогодні вже цілком очевидно, що освоєння адитивних технологій зумовлює коригування принципів конструювання БпЛА, відпрацювання технологій друку, використання нових стратегій побудови, появу нових, суміжних з 3D-друком технологій. Тому аналіз механізмів управління якістю розробки елементів безпілота свідчить, що технологічна схема підбору композиційного матеріалу є важливим елементом для 3D-друку сучасних БпЛА та їх комплектуючих. Перспективою подальших досліджень є розроблення методики підбору матеріалу для виготовлення деталей безпілота за адитивними технологіями.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. 3D printing community: MakerBot's Thingiverse. URL: <https://www.thingiverse.com/> (last accessed: 20.06.2022).
2. Учебный центр ведущих мировых производителей 3D-принтеров. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-in-production/> (дата обращения: 01.06.2022).

3. Relativity Space, Inc.: the world's first autonomous rocket factory and launch services leader for satellite constellations. URL: <https://www.relativityspace.com/stargate/> (last accessed: 20.06.2022).
4. Green Car Congress Magazine: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility. URL: <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html> (last accessed: 20.06.2022).
5. 3D PRINTING & ADDITIVE MANUFACTURING INTELLIGENCE: TCT Magazine. URL: [www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffieldtrials-3d-printed-unmanned-aircraft/](http://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffieldtrials-3d-printed-unmanned-aircraft/)) (last accessed: 20.06.2022).
6. Обеспечение качества аддитивного производства посредством системы контроля послойного синтеза / А. В. Чабаненко, Е. Г. Семенова, В. О. Смирнова, А. О. Смирнов, Н. Н. Рожков // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 75–79.
7. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 137, Iss. 12. P. 48545. <https://doi.org/10.1002/app.48545>
8. Кондрашов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А., Сорокин А. Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49>
9. Савицкий Н. В., Шатов С. В., Ожищенко О. А. 3D-печать строительных объектов // Вестник Приднепровской гос. академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (216). С. 18–26.
10. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // Virtual and Physical Prototyping. 2016. Vol. 11, Iss. 3. P. 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Ming Jen Tan. Anisotropic mechanical performance of 3Dprinted fiber reinforced sustainable construction material // Materials Letters. 2017. Vol. 209. P. 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
12. Kablov E. N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90, No. 2. P. 225–228. <https://doi.org/10.1134/s1019331620020124>
13. Zhang X., Fan W., Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its application // Composites Communications. 2020. Vol. 21. P. 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>
14. Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites / Peng X., Zhang M., Guo Z. et al. // Composites Communication. 2020. Vol. 22. P. 100478. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>
15. Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimization through reology / Bertolino M., Battegazzore D., Arrigo R. et al. // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 40. P. 101944. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101944>

Стаття надійшла до редакції 06.07.2022.



**REFERENCES**

1. *3D printing community: MakerBots Thingiverse.* (n.d.). Retrieved from <https://www.thingiverse.com/>
2. *Uchebnyi tsentr vedushchikh mirovykh proizvoditelei 3D-printerov [Training center for the world's leading manufacturers of 3D printers].* (n.d.). Retrieved from <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-in-production/> [in Russian].
3. *Relativity Space, Inc.: the world's first autonomous rocket factory and launch services leader for satellite constellations.* (n.d.). Retrieved from <https://www.relativityspace.com/stargate/>
4. *Green Car Congress Magazine: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility.* (n.d.). Retrieved from <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html>
5. *3d Printing & Additive Manufacturing Intelligence: TCT Magazine.* (n.d.). Retrieved from [www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffieldtrials-3d-printed-unmanned-aircraft/](http://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffieldtrials-3d-printed-unmanned-aircraft/)
6. Chabanenko, A. V., Semenova, E. G., Smirnova, V. O., Smirnov, A. O., Rozhkov, N. N. (2018). Obespechenie kachestva additivnogo proizvodstva posredstvom sistemy kontrolya posloinogo sinteza [Assuring the quality of additive manufacturing through a layered synthesis control system]. *Voprosy radioelektroniki [Questions of radio electronics]*, 10, 75–79 [in Russian].
7. Spoerk, M., Holzer, C., & Gonzalez-Gutierrez, J. (2019). Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of Applied Polymer Science, Vol. 137, Iss. 12.* P. 48545. <https://doi.org/10.1002/app.48545>
8. Kondrashov, S. V., Pykhtin, A. A., Larionov, S. A., & Sorokin, A. E. (2019). Vliianie tekhnologicheskikh rezhimov FDM-pechati i sostava ispol'zuemykh materialov na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki FDM-modelei (obzor) [Influence of technological modes of FDM printing and the composition of materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review)]. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 10 (82), 34–49. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49> [in Russian].
9. Savitskii, N. V., Shatov, S. V., & Ozhishchenko, O. A. (2016). 3D-pechat' stroitel'nykh ob"ektov [3D-printing of building objects]. *Vestnik Pridneprovskoi gos. akademii stroitel'stva i arkhitektury [Bulletin of the Pridneprovsk State University. academy of construction and architecture]*, 3 (216), 18–26 [in Russian].
10. Bos F. et al. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping, Vol. 11, Iss. 3,* 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, & Ming Jen Tan. (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters, Vol. 209,* 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
12. Kablov E. N. (2020). New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences, Vol. 90, No. 2,* 225–228. <https://doi.org/10.1134/s1019331620020124>
13. Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. (2020). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its application. *Composites Communications, 21,* 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>

14. Peng, X., Zhang, M., & Guo, Z. et al. (2020). Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Communication*, Vol. 22, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>
15. Bertolino, M., Battezzore, D., & Arrigo, R. et al. (2021). Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimization through reology. *Additive Manufacturing*, 40, 101944. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101944>

**V. V. Bachynskiy, O. M. Shkurpit**

## **MATERIAL SELECTION FOR MANUFACTURING UAV ELEMENTS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES**

*Additive technologies have made it possible to form a fundamentally new direction in the technology of unmanned aerial vehicles production, with the help of which it is possible to manufacture single and unique samples of products due to the layer-by-layer build-up of material by the method of layer-by-layer synthesis with the simultaneous obtaining of the given shape and dimensions of the next product based on a digital prototype. Modern capabilities of equipment and materials are rapidly evolving towards larger product sizes, higher accuracy and quality, high product printing speeds and low costs. When using traditional methods of production, the cost and complexity of unmanned aerial vehicles is quite high. The use of additive technologies allows you to significantly reduce the weight of the UAV body due to the reduction of material consumption.*

*The article investigates the properties of various polymers used in additive manufacturing, determines their impact on the quality of unmanned aerial vehicles elements, and also develops a methodology for selecting materials for the manufacture of unmanned aerial vehicles elements.*

*The conducted research revealed a whole layer of issues and problems related to the need to improve the 3D printing process, organization and management of the printing of complex elements of the air defense system, which would allow effective use of the latest additive 3D printing technologies in modern production in combat conditions.*

*According to the results of the research, the properties of the main materials for 3D printing, which are used in the FDM technology of obtaining the product, have been established. It has been established that the use of additive technologies will entail the adjustment of unmanned aerial vehicles design principles, the development of printing technologies, the use of new construction strategies, and the emergence of new technologies related to 3D printing. The analysis of quality control mechanisms for the development of unmanned aerial vehicles elements shows that the technological scheme for the selection of composite material is an important element in the 3D printing of modern unmanned aerial vehicles and their components.*

*It was determined that with the improvement of technological equipment and the development of methods of material selection for the manufacture of unmanned aerial vehicles elements, the direction of creating new unmanned aerial vehicles with the help of additive technologies will steadily expand.*

**Keywords:** *additive technologies; unmanned aerial vehicles; 3D printing; polymer; structure.*

Б. О. Дем'янчук, О. В. Сухін, А. В. Косенко, О. П. Угольніков

## ПРОГНОЗНІ ОЦІНКИ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ

*У статті обґрунтовано залежність ефективності забезпечення живучості зразків озброєння та військової техніки від рівнів інтенсивності протидії різноманітних факторів, які характеризуються можливостями технічних засобів протидії засобам розвідки і вогневого впливу противника, а також можливостями його сил і засобів. Саме наявність і своєчасне застосування можливостей та ресурсів сприятимуть збереженню функцій озброєння і відновленню його в разі пошкоджень. До цих факторів в узагальненому вигляді належать протидіючі впливи різних сучасних та перспективних засобів: з одного боку, розвідки і вогневого ураження наших сил противником; з іншого – маскування наявності техніки на позиції, пересування на марші та підготовки до функціонування наших зразків озброєння і техніки передусім шляхом створення та широкого практичного застосування широкосмугових радіопоглинальних матеріалів із потрібними властивостями поглинання енергії електромагнітного поля для зменшення їх помітності.*

*Обґрунтовано вимоги і можливості ефективного захисту озброєння та військової техніки за допомогою застосування саме широкосмугових композиційних полімерних феритових матеріалів, що поглинають енергію хвиль мікрохвильового та інфрачервоного діапазонів хвиль радіолокаційних засобів технічної розвідки та тепловізійних приладів.*

*Визначено: залежність показника збереження функцій озброєння, у разі застосування засобів радіолокаційного маскування, від дальності їх виявлення технічними засобами розвідки; залежність параметрів прогнозного тренда змін за часом показника відновлення зразків озброєння, у разі їх пошкодження противником, та довірчих інтервалів тренда на перспективному інтервалі часу їх бойового застосування.*

*Запропоновано також метод визначення оптимальних параметрів тренда процесу змін за часом показника оперативної готовності зразків озброєння та військової техніки, у разі їх відмов на критичному інтервалі часу експлуатації, що дозволяє встановлювати прогнозну величину показника готовності на заданий час його застосування та визначати, коли рівень цього показника готовності зразка озброєння стає незадовільним.*

**Ключові слова:** озброєння та військова техніка; технічні засоби розвідки; оцінки результатів застосування радіопоглинальних матеріалів; прогнозні оцінки показників живучості та готовності; показник збереження функцій озброєння; показник відновлення зразка озброєння.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Ефективність системи забезпечення живучості сучасних зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) залежить від інтенсивності протидії багатьох факторів в умовах сучасних бойових дій, передусім сукупності демаскувальних ознак, а саме, характеристик засобів зв'язку й управління; параметрів засобів розвідки та вогневого ураження озброєння противником.

© Б. О. Дем'янчук, О. В. Сухін, А. В. Косенко, О. П. Угольніков, 2022

Ефективний захист озброєння від технічних засобів розвідки і вогневої дії противника, а саме забезпечення живучості зразків озброєння під час виконання бойового завдання і вдень, і вночі, є принципово можливим передусім за умов їх надійного маскуванню з метою збереження функцій кожного зразка під час дії противника. Забезпечення живучості шляхом швидкого відновлення пошкоджених противником зразків, як правило, суттєво ускладнене на практиці через типові значні їх пошкодження високоточною зброєю, а також через непростий та тривалий процес відновлення протягом його типових етапів, які передбачають: технічну розвідку рівня і місць пошкодження, евакуацію зразків, їх ремонт та повернення у стрій.

Для запобігання дистанційного ураження зразків ОВТ вогневими засобами противника, тобто для надійного збереження функцій під час його дії, маскуванню за допомогою радіопоглинального покриття повинно бути передусім широкосмуговим за діапазоном електромагнітних хвиль, протирадіолокаційним і протиракетним, що не знижує маневреності озброєння.

Досвід військових конфліктів та наших досліджень показують, що радіопоглинальні засоби маскуванню для зниження радіолокаційної помітності ОВТ повинні мати коефіцієнт віддзеркалення хвиль у радіолокаційному та інфрачервоному діапазонах на рівні -20–30 дБ. Це відповідає послабленню потужності електромагнітного поля, що віддзеркалюється від зразка ОВТ у сторону розвідувальних засобів противника, у 100–1000 разів. При цьому згідно з рівнянням радіолокації дальність засобу розвідки зразка озброєння противником зменшується в 3,15–5,6 рази.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання живучості озброєння найбільш гостро постають під час використання противником високоточної зброї, після виявлення засобів ОВТ технічними засобами радіолокаційної та космічної розвідки.

Технічні рішення щодо підвищення показників живучості реалізуються як на етапах створення нових, перспективних типів, наприклад, бойових машин, так і під час проведення заходів модернізації наявного парку зразків озброєння.

У наукових статтях [1, 2] сформульовано напрямки підвищення технічних характеристик бойових броньованих машин, які направлені на: оптимізацію компонувальних схем; впровадження засобів посилення протимінної стійкості; бронювання різних видів із використанням сучасних високоміцних матеріалів; підвищення мобільності та зменшення маси бойових броньованих машин. У [3–5] описано принципи формування перспективних типів бойових броньованих машин шляхом їх багатофакторного порівняння та запропоновано варіанти технічних рішень з метою підвищення живучості цих зразків.

У роботі [6] розроблено методику техніко-економічного порівняння альтернативних варіантів застосування пасивних засобів маскуванню від засобів розвідки в діапазонах електромагнітних хвиль різних частот електромагнітного поля. Метою є техніко-економічне порівняння відомих варіантів модернізації типового зразка військової техніки та вибір кращого з них за критерієм «ефективність – вартість».

Отже, зараз актуальності набуває питання оцінювання ефективності системи забезпечення живучості озброєння в широкому напрямку розробки, впровадження та застосування і матеріалів для маскуванню, і сил та засобів для відновлення озброєння й техніки, у разі їх пошкодження противником в умовах безкомпромісного протиборства.

Під час дії технічних засобів розвідки озброєння і вогневих засобів противника це сприятиме вирішенню завдання збільшення живучості озброєння і шляхом збереження функцій зразків ОВТ, і шляхом своєчасного відновлення пошкодженого озброєння. Цю актуальність підтверджує саме зараз досвід сучасної бойової протидії, а також прогноз перспективних напрямів розвитку засобів протидії.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою дослідження є оцінка ефективності заходів для збільшення узагальненого показника живучості зразків ОВТ: по-перше, збереження функцій зразків під час впливу противника, тобто дій сил і засобів його розвідки та вогневого ураження за даними технічних засобів, шляхом створення і застосування передусім широкосмугових радіопоглинальних матеріалів; по-друге, шляхом прискореного відновлення зразків ОВТ, завдяки своєчасній підготовці та застосуванню сил і засобів технічної розвідки пошкоджених зразків, їх евакуації й засобів ремонту (за допомогою блочних комплектів) у польових умовах.

### Виклад основного матеріалу

**Визначення кількісного показника живучості ОВТ.** Надійне маскування зразка озброєння від виявлення його за допомогою технічних засобів розвідки (ТЗР) противником в умовах сучасного бойового протистояння є принципово потрібним. Захист інформації про координати дислокації та напрям переміщення зразка в процесі виконання завдань за призначенням однозначно сприяє його живучості, тому що він є пріоритетною ціллю для противника під час вогневого ураження. Крім того, вирішення проблеми живучості зразків ОВТ шляхом швидкого та своєчасного їх відновлення, в разі пошкодження противником в умовах динаміки сучасного бою, є сумнівним, тому що час відновлення в польових умовах пошкодженого зразка ОВТ (навіть у разі пошкодження середнього ступеня) становитиме, мабуть, десять годин чи навіть добу.

Тому виникає необхідність удосконалювати не тільки методи, технологію і засоби для збереження функцій зразків ОВТ під час дії противника, але й удосконалювати методи, технологію і засоби для швидкого, своєчасного відновлення ОВТ протягом послідовного виконання його етапів: *технічної розвідки* пошкоджених зразків, *їх евакуації, ремонту, повернення у стрій*.

Кількісна оцінка узагальненого показника живучості зразка, а саме ймовірності  $P_{жс}(t)$  перебування його в живучому стані в ході бойових дій, залежить передусім від імовірності  $P_{\phi}(t)$  збереження функцій ОВТ під час безпосередньої дії на нього засобів розвідки і вогневих засобів ураження, а також від імовірності відновлення зразків у разі пошкодження їх противником.

Отже, імовірність перебування ОВТ у живучому стані протягом часу бою доцільно надати у вигляді виразу

$$P_{жс}(t) = P_{\phi}(t) + [1 - P_{\phi}(t)] \cdot P_e(\Delta t \leq t_3), \quad (1)$$

де  $\Delta t$  – час, який є фактично потрібним для процесу відновлення, містить такі етапи: технічна розвідка пошкодженого зразка ОВТ; його евакуація; ремонт; повернення у стрій;

$t_3$  – відомий (середній) час, заданий (командиром, начальником) для відновлення зразка ОВТ у разі пошкодження його в бою.

Ця форма кількісного визначення узагальненого показника живучості зразка озброєння не суперечить формі, наданій у Військовому енциклопедичному словнику [7].

Згідно з формулою (1) в умовах звичайно великого інтервалу часу  $\Delta t$ , який є суттєво меншим заданого часу  $t_e$  саме через завжди низький рівень ймовірності  $P_e (\Delta t \leq t_e)$ , передусім у разі малого рівня ймовірності  $P_{\phi}$  збереження функцій зразка під час його маскуванню завжди отримуватиме практично нульовий рівень ймовірності  $P_{\text{жс}}$  перебування ОБТ у живучому стані в бойових умовах. Саме тому принципово потрібне надійне збереження функцій ОБТ у процесі їх застосування за призначенням під час дії технічних засобів технічної розвідки та вогневого ураження.

**Визначення залежності показника забезпечення живучості зразків ОБТ від дальності їх виявлення в умовах застосування радіопоглинальних матеріалів.** Оцінимо ефективність системи захисту зразків озброєння від пошкодження противником, а саме вплив захисту від ТЗР, зокрема в мікрохвильовому та ГЧ діапазоні хвиль [8–10].

Розробка, виробництво та техніко-економічне порівняння альтернативних варіантів сучасних радіопоглинальних матеріалів є принципово необхідними етапами їх упровадження до практичного застосування через суттєві фінансові витрати на ефективну реалізацію [11, 12].

Відома залежність дальності радіолокаційної розвідки типового зразка ОБТ від параметрів радіолокатора противника, за умов відсутності радіопоглинальних засобів захисту зразка від ТЗР противника, у такому вигляді:

$$v_0 = \left\{ \frac{G \cdot P \cdot \sigma_0 \cdot \lambda^2}{P_{\text{пр.мін}}} \right\}^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

де  $G$  – коефіцієнт посилення антени локатора, що дорівнює, наприклад,  $8 \cdot 10^4$ ;

$P$  – потужність передавача радіолокатора, яка має величину  $10 \cdot 10^4$  Вт;

$P_{\text{пр.мін}}$  – пороговий рівень чутливості приймача  $10^{-9}$  Вт;

$\lambda$  – довжина хвилі електромагнітного випромінювання радіолокатора  $1 \cdot 10^{-1}$  м;

$\sigma_0$  – ефективна відбивальна поверхня зразка ОБТ, що дорівнює  $50$  м<sup>2</sup>.

Згідно з формулою (2), в умовах відсутності маскуванню зразка ОБТ за допомогою радіопоглинальних матеріалів для зниження дальності розвідки його противником, отримаємо максимальну величину  $v_0$  дальності виявлення його у вигляді

$$v_0 = \left\{ \frac{10^5 \cdot (10 \cdot 10^3) \cdot 50 \cdot 1^2}{10^{-10}} \right\} = 1,49 \cdot 10^5 \text{ м} = 149 \text{ км.}$$

Повторимо далі розрахунки, за умови, що обслуга зразка військової техніки має застосовувати заходи захисту цього зразка від ТЗР противника за допомогою чохла з композитним радіопоглинальним феритовим матеріалом для маскуванню техніки. Ці чохла є насиченими радіопоглинальним композитним матеріалом, який має полімерну (зокрема, термоеластопластову) основу, наповнену дисперсним, наприклад, ферит-

феритовим оксидом перехідних металів з молекулярною структурою шпінелі оберненого типу. Саме такий RAM має достатні поглинальні властивості, механічну міцність, еластичність та масову густину.

Коефіцієнт зменшення радіолокаційної помітності металевого зразка ОБТ, за умови насичення цього чохла композитом, залежно від різних варіантів насичення його тканини розчином термоеластопласту (у толуолі) з ферит-феритовим наповнювачем, може дорівнювати величинам  $K = 10; 100; 1000$ .

У цьому разі формула (2) набуває такого вигляду:

$$v_0 = \left\{ \frac{G \cdot P \cdot (\sigma_0 / K) \cdot \lambda^2}{P_{np.min}} \right\}^{\frac{1}{4}}. \quad (3)$$

### Приклад 1

$$\begin{aligned} K = 10; \quad v(K = 10) &= 84,1 \text{ км}; \\ K = 100; \quad v(K = 100) &= 47,3 \text{ км}; \\ K = 1000; \quad v(K = 1000) &= 26,6 \text{ км} \end{aligned}$$

Із формул (2) та (3) випливає залежність коефіцієнта  $m$  зменшення дальності розвідки зразка ОБТ у вигляді

$$m(K) = \frac{v_0(K=1)}{v(K \geq 1)}. \quad (4)$$

### Приклад 2

$$\begin{aligned} m(10) &= 149 / 84.1 = 1,8; \\ m(100) &= 149 / 47.3 = 3,2; \\ m(1000) &= 149 / 26.6 = 5,6. \end{aligned}$$

Далі доцільно оцінити ймовірність забезпечення живучості  $P_{ж}$  за допомогою формули (1) з урахуванням впливу на цей показник засобів маскування згідно з (4).

За умови відсутності радіопоглинальних засобів зниження помітності зразка озброєння, ймовірність забезпечення живучості  $P_{ж}$  (під час дії розвідки й вогневих засобів противника) суттєво зменшується.

Ця величина збереження функцій зразка озброєння  $P_{\phi}$  у формулі (1) є близькою до нуля (наприклад, за  $P_e = 0,17$ , на практиці вона також мало відрізняється від 0,17 у разі пошкодження зразка і близької до нуля ймовірності відновлення). А за умови наявності засобів маскування, згідно з (3) і (4), маємо збільшення і показника збереження функцій, пропорційного коефіцієнту  $m(K)$ , і показника відновлення, а саме показника забезпечення живучості зразка озброєння відповідно до скорегованої формули

$$P_{жс} = P_{\phi o} m(K) + [1 - P_{\phi o} \cdot m(K)] \cdot P_e (\Delta t \leq t_e) m(K). \quad (5)$$

Дійсно, згідно з (4) і (5), маємо відповідні результати.

### Приклад 3

$$\begin{aligned} P_{\phi} (K = 1) &= 0,17; & P_e (K = 1) &= 0,17; & P_{жс} (K = 1) &= 0,31; \\ P_{\phi} (K = 10) &= 0,17 \cdot 1,8 = 0,3; & P_e (K = 10) &= 0,17 \cdot 1,8 = 0,3; & P_{жс} (K = 10) &= 0,51; \\ P_{\phi} (K = 100) &= 0,17 \cdot 3,2 = 0,54; & P_e (K = 100) &= 0,17 \cdot 3,2 = 0,54; & P_{жс} (K = 100) &= 0,79; \\ P_{\phi} (K = 1000) &= 0,17 \cdot 5,6 = 0,95; & P_e (K = 1000) &= 0,17 \cdot 5,6 = 0,95; & P_{жс} (K = 1000) &= 0,99. \end{aligned}$$

З практичного досвіду випливає, що, за умов застосування феритових радіопоглинальних матеріалів, суттєвого зменшення їх коефіцієнта відбиття (у 1000 разів), тобто зменшення дальності розвідки ОБТ противником, імовірність відновлення зразків ОБТ за час, який не перевищує заданий, також збільшується. Цей результат досягається, мабуть, завдяки тому, що суттєво зменшуються можливості пошкодження зразків противником через суттєве скорочення обсягу простору, у межах якого противник здатний надійно пошкоджувати зразки ОБТ. Крім того, у цих умовах суттєво збільшується небезпека ураження саме розвідника.

Імовірність забезпечення живучості озброєння суттєво збільшується до рівня, що є близьким 0,99, відповідно до суттєвого нарощування якості радіопоглинальних матеріалів.

Технологія створення потрібних радіопоглинальних матеріалів ґрунтується на синтезі наповнювача (для полімерних композитів) у вигляді раніше вказаних оксидів перехідних металів з молекулярною структурою шпінелі оберненого типу, які мають високий рівень питомої електропровідності та високу магнітну проникність. Це сполучення є ефективним наповнювачем термостійкої полімерної основи. Кінцевий вигляд (форма застосування покриття) захисного радіопоглинального матеріалу завжди залежить від його конкретного призначення, умов й особливостей його практичного застосування.

У цілому вимоги, особливості технології створення, впровадження та практичне застосування цих покриттів металевої поверхні техніки або тканини для її маскування – це тема для подальших теоретичних і передусім експериментальних досліджень.

Далі доцільно розглянути залежність імовірності відновлення зразка ОБТ (у разі збільшення часу його бойового застосування), тобто оцінити інтенсивність зменшення другого доданка у формулі (1) для узагальненого показника живучості, від величини якого показник живучості зразка ОБТ, згідно з формулою (1), також суттєво залежить.

**Визначення параметрів прогнозного тренда змін за часом показника відновлення зразків ОБТ та довірчих інтервалів тренда.** Статистичне прогнозування можливостей та очікуваних результатів відновлення зразків ОБТ за часом, у разі їх пошкодження противником, доцільно базувати на ймовірнісній моделі деградації у вигляді опорного тренда, тобто на S-подібній кривій деградації. Вона є функцією часу, що зменшується під впливом протидіючих факторів та завжди доповнює логістичну криву розвитку до одиниці. Похідна цієї кривої  $P(t)$  має простий вигляд [13]:



$$dP(t)/dt = \alpha \cdot P(t)[1 - P(t)], \alpha < 0, \quad (6)$$

де  $P(t)$  – імовірність відновлення пошкодженого зразка озброєння за час, що дорівнює  $\Delta t$ , який не перевищує заданий  $t_s$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, який кількісно дорівнює різниці величин інтенсивності протидії факторів, що сприяють збільшенню ймовірності відновлення зразка, та факторів, які перешкоджають збільшенню ймовірності відновлення зразка у разі пошкоджень його противником.

Розв'язання диференційного рівняння (6) доцільно здійснювати з урахуванням початкових умов, наприклад, у вигляді  $P(t=0) = P_0$ .

Результат розв'язку цього диференційного рівняння (6) набуває такого вигляду:

$$P(t) = \left\{ 1 + (P_0^{-1} - 1) \exp[-\alpha t] \right\}^{-1}. \quad (7)$$

Саме цей варіант моделі опорного тренда доцільно використовувати далі для вирішення завдання прогнозування динаміки змін за часом показника відновлення, а саме, прогнозування оперативної (бойової) готовності зразка ОВТ до застосування протягом бою.

Залежність (7) доцільно використати далі як апроксимуючу (опорну) функцію часу, взявши декілька  $m$  дискретних дослідних значень показника  $P_k = P(t_k)$ ,  $\forall k = 1 \dots m$  готовності зразка ОВТ, які раніше дослідним шляхом були отримані експериментально у військовій частині за результатами відновлення зразків озброєння конкретного типу, з метою визначення його параметрів  $P_0^*$  та  $\alpha^*$  прогнозовної залежності методом, наприклад, найменших квадратів.

Алгоритм визначення параметрів  $P_0^*$  та  $\alpha^*$  залежності (7) прогнозного тренду динаміки змін показника у вигляді ймовірності відновлення ОВТ, тобто алгоритм побудови оптимального прогнозного тренда (7) та його довірчих інтервалів містить декілька етапів.

Спочатку доцільно визначити оцінки параметрів тренда та їх дисперсії. Розглянемо при цьому такі етапи.

1. Побудова суми квадратів відхилень дискретних величин  $P_k$  від  $P(t_k)$  у вигляді цільової функції  $\beta$ , яку необхідно мінімізувати і яка повинна дорівнювати мінімальній її величині

$$\beta = \sum_{k=1}^m \left\{ P_k - \left[ 1 + (P_0^{-1} - 1) \exp(-\alpha t) \right]^{-1} \right\}^2 = \min. \quad (8)$$

2. Вирівнювання цільової функції  $\beta$  шляхом введення нової функції, що дорівнює

$$f(t) = \ln[P^{-1}(t) - 1]. \quad (9)$$

3. Лінеаризація цільової функції (8) шляхом підстановки в неї нової функції (9), у результаті чого отримаємо

$$\beta = \sum_{k=1}^m \left\{ P_k - \left[ \ln(P_0^{-1} - 1) - \alpha t \right] \right\}^2 = \min. \quad (10)$$

4. Обчислення екстремуму (мінімуму) цільової функції (10) двох змінних шляхом визначення часткових похідних цієї функції за аргументами  $P_0$  і  $\alpha$  та прирівнювання їх до нуля. Далі доцільно отримати рівняння, що відповідають екстремуму цільової функції, у такому вигляді:

$$\frac{d\beta}{dP_0} \sum_{k=1}^m \left\{ P_k - \left[ \ln\left((P_0^*)^{-1} - 1\right) - \alpha^* t_k \right] \right\}^2 = 0; \quad (11)$$

$$\frac{d\beta}{d\alpha} \sum_{k=1}^m \left\{ P_k - \left[ \ln\left((P_0^*)^{-1} - 1\right) - \alpha^* t_k \right] \right\}^2 = 0.$$

5. Визначення із системи (11) оцінок  $P_0^*$  та  $\alpha^*$  параметрів прогнозного тренда з урахуванням (9) і (10), які дорівнюють

$$P_0^* = \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{\sum_{k=1}^m f_k \sum_{k=1}^m t_k^2 - \sum_{k=1}^m t_k \sum_{k=1}^m f_k t_k}{m \sum_{k=1}^m t_k^2 - \left( \sum_{k=1}^m t_k \right)^2} \right] \right\}^{-1}; \quad (12)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\sum_{k=1}^m f_k \sum_{k=1}^m t_k - m \sum_{k=1}^m f_k t_k}{m \sum_{k=1}^m t_k^2 - \left( \sum_{k=1}^m t_k \right)^2}. \quad (13)$$

6. Отримання прогнозного тренда, який, згідно із (7), (11), (13), має такий загальний вигляд:

$$P(t, \Delta t \leq t_3) = \left\{ 1 + \left[ (P_0^*)^{-1} - 1 \right] \exp \left[ -\alpha^*(t) \right] \right\}^{-1}. \quad (14)$$

7. Визначення за формулою (14) ймовірностей  $P_k = P(t_k)$ ,  $\forall k = 1 \dots m$  з метою побудови (для перспективного інтервалу часу) за обмеженою сукупністю дослідних значень  $P(t_k)$ ,  $\forall k = 1, 2, \dots, m$  узагальненого показника відновлення зразка ОВТ.

8. Пошук дисперсії оцінок  $P_0^*$  та  $\alpha^*$  параметрів тренда (14) шляхом підстановки оцінок (13), (14) у (8), у формулу мінімізованої суми квадратів відхилень дискретних даних прогнозного тренда (14)  $P(P_0^*, \alpha^*, t_k)$  від дискретних даних опорної кривої. Ці дані (як опорної кривої  $P(t_k)$ ,  $\forall k = 1, 2, \dots, m$ , так і прогнозовної кривої (14)) для обчислення

дисперсії  $\sigma^2$  прогнозних результатів за загальною формулою необхідно брати лише на ретроспективному інтервалі часу:

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^m \left\{ P_k - \left[ 1 + (P_0^{-1} - 1) \exp(-\alpha t_k) \right]^{-1} \right\}^2 / (m-1). \quad (15)$$

Зрозуміло, що величини цієї дисперсії однозначно зменшуються і шляхом збільшення інтервалу дослідного спостереження дискретних величин обраного показника пошкоджених зразків ОБТ, і шляхом збільшення точності його вимірювань, а також точності визначення відхилень дискретних величин показника від опорної кривої для прогнозування та параметрів опорної кривої на етапі спостережень.

Варто врахувати, що дисперсії  $\sigma_p^2$  і  $\sigma_\alpha^2$  окремого оцінювання  $P_0^*$  та  $\alpha^*$  за допомогою рівнянь (15) є сумірними та пов'язані із загальним рівнем дисперсії. Помилки прогнозування доцільно характеризувати однаковими середньоквадратичними величинами:

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_\alpha^2 = 0,5\sigma^2 + 0,5\sigma^2; \quad \sigma_p = \sigma / \sqrt{2}; \quad \sigma_\alpha = \sigma / \sqrt{2}. \quad (16)$$

9. Далі здійснюють побудову оптимального прогнозного тренда (14) і його довірчих інтервалів шляхом використання цього тренда, за умов різних рівнів оптимальних оцінок його параметрів і сумірних помилок їх оцінювання згідно з (16).

**Визначення довірчих інтервалів прогнозного тренда змін за часом показника відновлення зразка ОБТ.** Розв'язати задачу доцільно з урахуванням рівня дисперсії (16) оцінок параметрів прогновної функції (14) і зменшення за часом цього показника у вигляді ймовірності відновлення зразків.

Величини помилок (16) оцінювання параметрів прогнозного тренда (1) повністю впливають на ширину смуги довірчих інтервалів отриманих результатів прогнозування змін показника відновлення зразка ОБТ за часом його застосування за призначенням.

Довірчу смугу рівня зазначеного показника технічного стану зразка в конкретні моменти часу доцільно побудувати шляхом визначення трьох трендів: середнього та двох довірчих меж.

Побудова при цьому здійснюється за допомогою двох параметрів тренда  $P_0 = P_0^*$ ;  $\alpha = \alpha^*$  і трьох середньоквадратичних значень помилок оцінювання в такому вигляді:

$$P_0 = P_0^*; \quad \alpha = \alpha^*; \quad P_0 = P_0^* + 3\sigma_p; \quad \alpha^* - 3\sigma_\alpha; \quad P_0 = P_0^* - 3\sigma_p; \quad \alpha^* + 3\sigma_\alpha. \quad (17)$$

Умови (17) для побудови довірчої смуги з метою отримання смуги максимальної ширини, тобто одержання гарантованого результату прогнозу динаміки змін за часом показника відновлення зразка ОБТ.

Результати прогнозування і побудови довірчих інтервалів цього показника наведено на рис. 1.

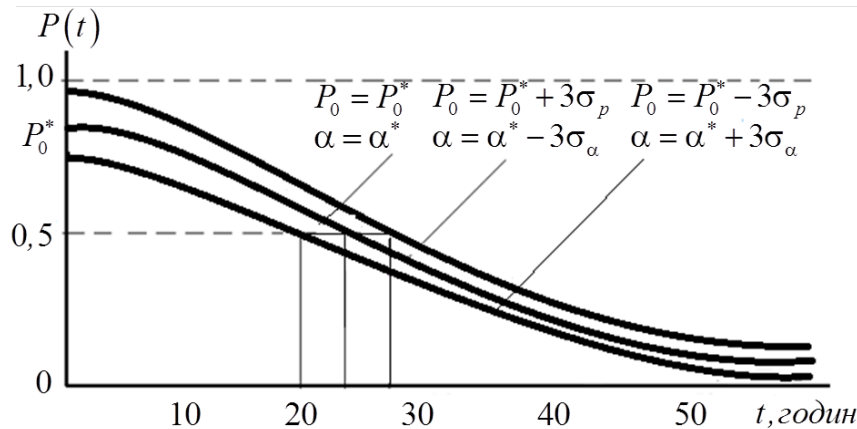


Рис. 1. Результати прогнозування тренда і побудова довірчих інтервалів показника відновлення зразка ОБТ за час, який не перевищує заданий, протягом його бойового застосування

**Визначення живучості зразків озброєння з урахуванням застосування радіопоглинальних матеріалів та засобів відновлення у разі пошкоджень зразка ОБТ.** Згідно з формулою (5), отриманою для визначення показника живучості озброєння, за умов збереження функцій озброєння та відновлення його в разі пошкоджень, відповідно до формули (14) доцільно визначити узагальнену залежність у такому вигляді:

$$P_{ж}(t) = P_{\phi o}(t) \cdot m(K) + [1 - P_{\phi o}(t) \cdot m(K)] \cdot P(t, \Delta t \leq t_e) m(K), \quad (18)$$

де  $P(t, \Delta t \leq t_3) = \left\{ 1 + \left[ (P_0^*)^{-1} - 1 \right] \exp[-\alpha^*(t)] \right\}^{-1}$ .

**Висновки.** Отримані результати розробки методики дослідження для прогнозування динаміки змін показника живучості зразків ОБТ протягом часу їх бойового застосування дають підстави для таких висновків.

1. Негативні фактори, що заважають збереженню функцій і швидкому відновленню зразків ОБТ, найбільш суттєво впливають протягом їх бойового застосування на динаміку змін оперативної готовності на потрібному рівні.

2. Збереження функцій живучості ОБТ та швидке відновлення зразків, у разі їх пошкодження, є принципово необхідним.

3. Методика визначення оптимальних параметрів тренда процесу змін за часом показника оперативної готовності ОБТ шляхом швидкого відновлення протягом бойових дій дозволяє обчислити прогнозну величину цього показника на заданий час його застосування. Окрім того, це дозволяє встановити час, коли рівень цього показника готовності зразка ОБТ стає незадовільним. Саме ця прогнозна інформація є потрібною для планування й організації адекватних заходів для надійного захисту зразка ОБТ шляхом своєчасного забезпечення його живучості.

4. Отримання оцінок оптимальних прогнозних параметрів динаміки змін (за часом бойового застосування) показника живучості конкретного зразка ОБТ є достатньо громіздкою процедурою, тому виникає необхідність здійснювати це за допомогою

комп'ютерного програмного продукту. В умовах, коли кількість зразків у військовій частині досягає сотень одиниць, програмне забезпечення є, безумовно, корисним.

5. Окрім запропонованих пасивних засобів захисту ОВТ від технічних засобів розвідки противника, не менш важливим і принципово необхідним є здійснення додаткових ефективних заходів збереження маневреності, швидкості та прохідності зразків ОВТ.

Отже, застосування всіх розглянутих засобів для узгодженого збереження функцій зразків ОВТ під час дії противника та для своєчасного відновлення, наприклад, їх базових шасі в сучасних умовах, є безумовно актуальним.

## **СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Зеленюх О. М., Тимко А. Ю., Пинчук М. В. Обґрунтування напрямків підвищення технічних характеристик бойових броньованих машин // Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. № 1 (59). С. 50–53.
2. Купріненко О. М. Обґрунтування принципів формування перспективних типів бойових броньованих машин // Системи озброєння і військова техніка. 2012. № 4 (32). С. 40–46.
3. Ковба В. Б., Рій В. Б. Обґрунтування технічних рішень щодо підвищення живучості автомобільної техніки Збройних Сил України // Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. № 1 (59). С. 54–58.
4. Бісик С. П., Купріненко О. М., Корбач В. Г. Оцінка протимінної стійкості легкої бойової колісної машини // Вісник НТУ "ХПІ". 2015. № 31. С. 11–20.
5. Львова Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов : монографія. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. 232 с.
6. Косенко А. В., Дем'янчук Б. О., Гончарук А. А., Артабаев Ю. З. Техніко-економічне порівняння варіантів маскуванню бойової броньованої машини для підвищення її живучості при використанні противником засобів технічної розвідки // Озброєння та військова техніка. 2020. № 4 (28). С. 83–98.
7. Советская военная энциклопедия [в 8 томах]. Т. III / Министерство обороны СССР. Москва, 1977. С. 333–334.
8. Особенности боевого применения высокоточных средств поражения и способы повышения эффективности борьбы с ними : учеб. / Под ред. Ю. Н. Черного. Минск : 1034 ЦВИИИ, 2008. 102 с.
9. Физические основы диапазонных технологий типа «Стелс» / Науч. ред. С. А. Масалов и др. Санкт-Петербург : ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1999. 250 с.
10. Сотников А. М., Сидоренко Р. Г. Оценка отражающих свойств наземных и воздушных объектов с пассивной защитой на основе композитных радиоизотопных покрытий // Системи управління, навігації та зв'язку. 2009. № 1 (9). С. 70–74.
11. Дем'янчук Б. О. Матеріали-перетворювачі електромагнітної енергії в теплову. Вимоги. Основи технології // Технологія и конструирование в электронной аппаратуре. 2006. № 5. С. 31–35.
12. Дем'янчук Б. О. Метод корекції хвильових опорів модифікованих радіозахисних композитів з гетерогенними наповнювачами // Зб. наук. праць Військ. ін.-ту Київськ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. 2011. № 31. С. 39–45.

13. Дем'янчук Б. О. Озброєння і техніка: теорія оновлення та удосконалення: підр. Одеса : Військова академія, 2020. 290 с.

Стаття надійшла до редакції 06.07.2022.

## REFERENCES

1. Zeleniukh, O. M., Tymko, A. Yu., & Pynchuk, M. V. (2020). Obgruntuvannia napriamkiv pidvyshchennia tekhnichnykh kharakterystyk boiovykh bronovanykh mashyn [Justification of directions for improving the technical characteristics of combat armored vehicles]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku [Control, navigation and communication systems]*, 1 (59), 50–53 [in Ukrainian].
2. Kuprinenko, O. M. (2012). Obgruntuvannia pryntsyviv formuvannia perspektyvnykh typiv boiovykh bronovanykh mashyn [Justification of the principles of formation of prospective types of combat armored vehicles]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Weapon systems and military equipment]*, 4 (32), 40–46 [in Ukrainian].
3. Kovba, V. B., & Rii, V. B. (2020). Obgruntuvannia tekhnichnykh rishen shchodo pidvyshchennia zhyvuchosti avtomobilnoi tekhniki Zbroinykh Syl Ukrainy [Justification of technical solutions to increase the survivability of the automotive equipment of the Armed Forces of Ukraine]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku [Control, navigation and communication systems]*, 1 (59), 54–58 [in Ukrainian].
4. Bisyk, S. P., Kuprinenko, O. M., & Korbach, V. H. (2015). Otsinka protymynnoi stiikosti lehkoi boiovoi kolisnoi mashyny [Assessment of anti-mine resistance of a light combat wheeled vehicle]. *Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of NTU "KhPI"]*, 31, 11–20 [in Ukrainian].
5. L'vova, L. A. (2003). *Radiolokatsionnaia zametnost' letatel'nykh apparatov [Radar visibility of aircraft]*. Snezhinsk [in Russian].
6. Kosenko, A. V., Dem'ianchuk, B. O., Honcharuk, A. A., & Artabaev, Yu. Z. (2020). Tekhniko-ekonomichne porivniannia variantiv maskuvannia boiovoi bronovanoi mashyny dlia pidvyshchennia yii zhyvuchosti pry vykorystanni protyvnykom zasobiv tekhnichnoi rozvidky [Technical and economic comparison of options for camouflaging an armored combat vehicle to increase its survivability when the enemy uses technical intelligence]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika [Armament and military equipment]*, 4 (28), 83–98 [in Ukrainian].
7. *Sovetskaia voennaia entsiklopediia [Soviet military encyclopedia]*. (1977). (Vols. 1–8; Vol. 3). Moscow [in Russian].
8. Chernyi, Iu. N. (Eds.). (2008). *Osobennosti boevogo primeneniia vysokotochnykh sredstv porazheniia i sposoby povysheniia effektivnosti bor'by s nimi [Features of the combat use of high-precision weapons and ways to increase the effectiveness of combating them]*. Minsk [in Russian].
9. Masalov, S. A. et al. (Eds.). (1999). *Fizicheskie osnovy diapazonnykh tekhnologii tipa «Stels» [Physical basis of range technologies such as "Stealth"]*. Saint Petersburg [in Russian].
10. Sotnikov, A. M., & Sidorenko, R. G. (2009). Otsenka otrazhaiushchikh svoistv nazemnykh i vozdushnykh ob'ektov s passivnoi zashchitoy na osnove kompozitnykh radioizotopnykh pokritii [Evaluation of the reflective properties of ground and air objects with passive protection based on composite radioisotope coatings]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku [Control, navigation and communication systems]*, 1 (9), 70–74 [in Russian].

11. Dem'ianchuk, B. O. (2006). Materialy-peretvoriuvachi elektromahnitnoi enerhii v teplovu. Vymohy. Osnovy tekhnolohii [Materials that convert electromagnetic energy into thermal energy. Requirements. Basics of technology]. *Tekhnologii i konstruirovaniie v elektronnoi apparature [Technology and design in electronic equipment]*, 5, 31–35 [in Ukrainian].
12. Dem'ianchuk, B. O. (2011). Metod korektsii khvylevykh oporiv modyfikovanykh radiozakhysnykh kompozytiv z heterohennymy napovniuvachamy [The method of correction of wave resistances of modified radio-shielding composites with heterogeneous fillers]. *Zb. nauk. prats Viisk. in.-tu Kyivsk. nats. un-tu im. Tarasa Shevchenka [Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University]*, 31, 39–45 [in Ukrainian].
13. Dem'ianchuk, B. O. (2020). *Ozbroiennia i tekhnika: teoriia onovlennia ta udoskonalennia [Armament and equipment: the theory of renewal and improvement]*. Odesa [in Ukrainian].

**B. O. Demianchuk, O. V. Suhin, A. V. Kosenko, O. P. Ugol'nikov**

### **PREDICTIVE ESTIMATES OF SYSTEM SURVIVABILITY OF WEAPONS**

*The article substantiates the dependence of the effectiveness of ensuring the survivability of weapons and military equipment on the levels of intensity of countermeasures against various factors, which are characterized by the capabilities of technical means of countermeasures against the enemy's intelligence and firepower and the capabilities of his forces and means. It is the presence and timely use of opportunities and resources that will contribute to the preservation of the functions of the weapon and its restoration in case of damage. These factors in a generalized form include the counteracting effects of various modern and promising means: on the one hand, reconnaissance and enemy fire; on the other - masking of military equipment in position, movement on the march and preparation for the functioning of weapons and equipment, first of all, through the creation and wide practical application of broadband radio absorbing materials with the necessary properties of absorbing the energy of the electromagnetic field to reduce their visibility.*

*The requirements and possibilities of effective protection of weapons and military equipment using broadband composite polymer ferrite materials that absorb the energy of waves in the microwave and infrared wave ranges of technical intelligence radar and thermal imaging devices are substantiated.*

*It was determined: the dependence of the index of preservation of weapons functions, in the case of the use of radar masking means, on the range of their detection by technical means of intelligence; dependence of the parameters of the forecast trend of changes over time of the indicator of the recovery of weapons samples, in case of their damage by the enemy, and the confidence intervals of the trend on the prospective time interval of their combat use.*

*A method of determining the optimal parameters of the trend of the process of changes over time of the indicator of operational readiness of weapons and military equipment in the event of their failure at a critical time interval of their operation is also proposed, which allows to determine the predictive value of the indicator of readiness for a given time of its application and to determine when the level of this indicator readiness of the weapon sample becomes unsatisfactory.*

**Keywords:** *weapons and military equipment; technical means of intelligence; evaluation of the results of the use of radio absorbing materials; predictive assessments of survivability and readiness indicators; indicator of preservation of weapons functions, indicator of restoration of a sample of weapons.*

**Андрєєв Олександр Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– космічні та геоінформаційні системи.

**Бачинський Вячеслав Васильович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Наукового центру Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

– навчально-тренувальні засоби;

– безпілотні літальні апарати;

– застосування адитивних технологій під час розробки елементів літальних апаратів.

**Бойченко Олег Сергійович** – кандидат технічних наук, заступник начальника науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– інформаційна та кібернетична безпека;

– системи захисту інформації;

– криптографічні системи захисту інформації.

**Гаценко Сергій Станіславович** – кандидат технічних наук, заступник начальника кафедри Національного університету оборони України імені Івана Черняховського.

Наукові інтереси:

– інформаційні системи.

**Горошко Олександр Олексійович** – викладач кафедри Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

– надійність автомобілів.

**Гризо Андрій Аркадійович** – кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідної лабораторії Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

– радіолокаційні системи;

– обробка сигналів;

– експлуатація радіоелектронних систем.

**Гришук Ольга Михайлівна** – молодший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– криптографічні системи захисту інформації.

**Дем'янчук Борис Олександрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

– математичне моделювання процесів забезпечення;

– розробка засобів маскування озброєння та військової техніки.

**Додух Олександр Миколайович** – кандидат технічних наук, викладач кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.



Наукові інтереси:

- радіолокаційні системи;
- обробка сигналів.

**Дубина Олександр Федорович** – кандидат технічних наук, доцент, викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка сигналів;
- космічні та геоінформаційні системи.

**Залевський Геннадій Станіславович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

- розширення інформативних можливостей радіолокаційних систем.

**Ісмаїлова Неля Петрівна** – доктор технічних наук, професор кафедри Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- прикладна механіка в озброєнні та військовій техніці;
- геометричне моделювання технічних форм та автоматизація їх проектування.

**Клязника Володимир Вікторович** – заступник начальника кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційно-вимірювальні системи.

**Косенко Артем Віталійович** – ад'юнкт науково-організаційного відділу Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- живучість військової техніки;
- засоби маскування озброєння та військової техніки.

**Костерев Дмитро Сергійович** – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах.

**Костиця Олександр Олексійович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

- радіолокаційні системи;
- формування та обробка сигналів;
- синхронізація часу та частоти.

**Левченко Андрій Олександрович** – провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу Наукового центру Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- прикладна механіка в озброєнні та військовій техніці;
- геометричне моделювання технічних форм та автоматизація їх проектування.

**Люлька Олександр Валерійович** – заступник начальника факультету Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

– повітряно-десантна техніка.

**Маковський Ігор Юрійович** – старший науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– криптографічні системи захисту інформації;  
– захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах.

**Марченко Володимир Петрович** – викладач кафедри Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

– застосування автомобілів та бронетанкової техніки.

**Міняйло Володимир Миколайович** – помічник начальника навчального відділу Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– моделювання радіотехнічних засобів.

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

Наукові інтереси:

– цифрова обробка сигналів;  
– розпізнавання сигналів;  
– радіопеленгування.

**Невмержицький Ігор Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

– радіолокаційні системи; обробка сигналів;  
– моделювання радіоелектронних систем.

**Нікітчук Тетяна Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, завідувача кафедрою Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

– інформаційно-вимірювальні системи.

**Очуренко Олександр Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

– оптимізація обробки сигналів на фоні завад;  
– подавлення завад.

**Пулеко Ігор Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– космічні та геоінформаційні системи.

**Сидорчук Ольга Леонідівна** – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- радіоелектронний захист складних антенних систем;
- теоретичні дослідження електромагнітного поля.

**Стовба Руслан Леонідович** – викладач кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

- оптимізація роботи радіолокаційних приймальних систем.

**Сухін Олег Валерійович** – начальник факультету Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- комплексне відновлення пошкоджених зразків озброєння та військової техніки;
- математичне моделювання процесів забезпечення.

**Таршин Володимир Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба.

Наукові інтереси:

- навігація за зображеннями місцевості;
- обробка радіолокаційних сигналів.

**Трутнєв Сергій Геннадійович** – аспірант Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Наукові інтереси:

- прикладна механіка в озброєнні та військовій техніці;
- геометричне моделювання технічних форм та автоматизація їх проектування.

**Угольніков Олександр Павлович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- математичне моделювання процесів забезпечення;
- підвищення ефективності ведення технічної розвідки.

**Шарипова Ільнара Віл'євна** – аспірант Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

Наукові інтереси:

- прикладна механіка в озброєнні та військовій техніці;
- геометричне моделювання технічних форм та автоматизація їх проектування.

**Шкурпіт Олександр Миколайович** – ад'юнкт науково-організаційного відділу Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- застосування адитивних технологій під час розробки елементів літальних апаратів.

**Ярмолюк Вадим Михайлович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри Військової академії (м. Одеса).

Наукові інтереси:

- бронетанкова техніка;
- навчально-тренувальні засоби.

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

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

**Збірник наукових праць**

**Випуск 22**

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 04.08.2022. Формат 60 × 84 / 8.

Ум. друк. арк. 13,48. Тираж 100 прим. Зам. 280 офс.

Безкоштовно  
Друкарня ЖВІ

10004, м. Житомир, просп. Миру, 22