

ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА 2(50) WEAPONS AND 2026 MILITARY EQUIPMENT

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
DOI: <https://doi.org/1034169/2414-0651>

ЩОКВАРТАЛЬНИК
ВИДАЄТЬСЯ З СІЧНЯ 2014 РОКУ

SCIENTIFIC JOURNAL
DOI: <https://doi.org/1034169/2414-0651>

QUARTERLY
PUBLISHED SINCE JANUARY 2014

Голова редакційної колегії

Чепков І.Б.,
д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Заступник голови редакційної колегії

Наланко О.Л.,
PhD (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Відповідальний секретар редакційної колегії

Глазкова С.В.,
к.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Редакційна колегія

Моллой Олександра,
PhD, (УНПУ), Австралія

Жоховський Павло,
PhD (ВІТО), Польща

Томашевська Юстина,
д.т.н., (ВІТО), Польща

Блінцов В.С., д.т.н. (НУК)

Богданов В.Л.,
д.ф.-м.н. (НАН України)

Головін О.О.,
д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Горбулін В.П.,
д.т.н., акад. (НАН України)

Журавський Ю.В., д.т.н. (ДУЖП)

Кучеров Д.П., д.т.н. (НАУ)

Лейко О.Г., д.т.н. (НТУУ КПІ)

Позняков В.Д.,
д.т.н. (НАН України)

Слюсар В.І.,
д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Сотник В.В.,
к.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Editorial Director

Chepkov I.B.,
DEng (CSRI AME AFU) Scopus ID: 6507925808

Deputy of Editorial Director

Nalancko O.L.,
PhD (CSRI AME AFU) Scopus ID: 57209022184

Executive Secretary of Editorial Board

Glazkova S.V.,
PhD (CSRI AME AFU) Scopus ID: 57212144054

Editorial board

Molloi Oleksandra,
PhD, (UNSU), Australia Scopus ID: 57190617958

Zhovovskiy Pavlo,
PhD (WITA), Poland Scopus ID: 56426310100

Tomashevskaya Ustyna,
DEng (WITA), Poland Scopus ID: 34168413700

Blintsov V.S., DEng (NUS) Scopus ID: 57205606523

Bogdanov V.L.,
DEng (NASU) Scopus ID: 7102093164

Holovin O.O.,
DEng (CSRI AME AFU) Scopus ID: 57216953372

Horbulin V.P.,
DEng, Acad. (NASU) Scopus ID: 57216353855

Zhuravskiy Yu. V., Deng (SUZP) Scopus ID: 57216965688

Kuchеров D.P., DEng (NAU) Scopus ID: 6506326427

Leiko O.H., DEng (NTUU KPI) Scopus ID: 6603080789

Poznyakov V.D.,
DEng (NASU) Scopus ID: 6602560493

Slyusar V.I.,
DEng (CSRI AME AFU) Scopus ID: 7004240035

Sotnik V.V.,
PhD (CSRI AME AFU) Scopus ID: 57351623900

Адреса редакції:

Україна, 03049, м. Київ,
пр-т Повітряних Сил, 28
Тел.: (044) 271-13-66 / Факс: (044) 520-12-84
E-mail: cndi_ovt@ukr.net
Сайт: <https://journal.cndiovt.com.ua>

Внесено до Реєстру суб'єктів у сфері друкованих медіа за ідентифікатором медіа R30-06129 (рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 29 травня 2025 року №1136).

Журнал входить до переліку наукових фахових видань Міністерства освіти і науки України, категорія Б (наказ № 928 від 11.06.2026)



Відповідальність за зміст поданих матеріалів несуть автори.

© ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2026

Editorial address:

Ukraine, 03049, Kyiv
28, Povitrianykh Syl Ave
tel.: (044) 271-13-66 / fax: (044) 520-12-84
E-mail: cndi_ovt@ukr.net
Site: <https://journal.cndiovt.com.ua>

Entered into the Register of entities in the field of print media by media identifier R30-06129 (decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting dated May 29, 2025 No.1136).

Journal is in the list of scientific professional publications of the Ministry of Education and Science of Ukraine Category B (order No. 928 of 11.06.2026)



The authors are responsible for the content of the submitted materials.

© CSRI AME AFU, 2026

У НОМЕРІ / TABLE OF CONTENTS

ВОЄННО-ТЕХНІЧНА ПОЛІТИКА / MILITARY TECHNICAL POLICY

Можаровський В. М., Зубарев В. В., Веретнов А. О., Мельник Б. О. Методологічні основи системного дослідження ефективності технічного забезпечення військ

(Mozharovskyi V. M., Zubarev V. V., Veretnov A. O., Melnyk B. O.) Methodological foundations of the systemic study of the effectiveness of troop technical support

4

МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ / METHODS OF SCIENTIFIC RESEARCH

Ларін О. Ю., Мустафін М. А., Крайнік В. Я., Сук С. П. Огляд та критичний аналіз методів оцінювання занурення пенетраторів у перешкоди (цілі)

(Larin, O. Yu., Mustafin, M. A., Krainik, V. Ya., Suk, S. P.) Review and critical analysis of methods for evaluating penetrator penetration into barriers (targets)

15

АРТИЛЕРІЙСЬКЕ ТА СТРИЛЕЦЬКЕ ОЗБРОЄННЯ / ARTILLERY WEAPONS & SMALL ARMS

Майстренко О. А., Остапчук Е. С., Адаменко Б. І., Тимошко О. В. Технології підвищення дальності стрільби артилерійських боєприпасів: донний газогенератор, активно-реактивний снаряд та прямооточний повітряно-реактивний двигун – порівняльний аналіз

(Maystrenko O. A., Ostapchuk E. S., Adamenko B. I., Timochko O. V.) Technologies for increasing the firing range of artillery ammunition: bottom gas generator, active-jet projectile and direct-flow air-jet engine – comparative analysis

27

РАДІОТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ / RADIO-TECHNICAL FACILITIES

Твердохлібов В. В., Попов А. О., Зібін С. Д., Білобородова Л. В. Порівняльний аналіз ефективності чотирьох методів просторової фільтрації сигналів на фоні перешкод у РЛС з планарною антенною решіткою

(Tverdokhlibov V. V., Popov A. O., Zibin S. D., Biloborodova L. V.) Comparative analyzing the efficiency of four methods of spatial signal filtering amid jam conditions in radar system with planar antenna array

32

ОЗБРОЄННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ / AIRCRAFT ARMAMENT & FACILITIES

Богданов В. Л., Григоренко О. Я., Чепков І. Б., Одноралов І. В., Кучинський А. В., Кременицький В. В., Сперкач С. О. Результати застосування методу скануючої електронної мікроскопії при дослідженні металевих фрагментів гіперзвукових аеробалістичних ракет Х-47М2 «Кинжал»

(Bogdanov V. L., Grygorenko O. Ya., Chepkov I. B., Odnorolov I. V., Kuchinskyi A. V., Kremenytskyi V. V., Sperkach S. O.) Results of the application of the method of scanning electron microscopy in the study of metal fragments of X-47M2 «Kinzhal» (9-A-7660) hypersonic aeroballistic missiles

44

БЕЗПЛОТНІ АВІАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ / UAV

Кучер Д. В., Пашиньський Р. С. Щодо можливості порушень роботи акселерометрів навігаційної системи БПЛА противника зовнішнім вібраційним впливом

(Kucher D. V., Pashynskyi R. S.) On the possibility of disrupting adversarial UAV navigation system accelerometers via external vibrational impact

53

Тригуб В. С., Білан І. А. Комбіноване акустико-тепловізійне донаведення автономних дронів-перехоплювачів на малозшвидкісні повітряні цілі типу Shahed-136

(Tryhub V. S., Bilan I. A.) Combined acoustic-thermal terminal guidance of autonomous interceptor drones against low-speed air targets of the Shahed-136 type

59

Лютфалієв Е. Г. Аналіз впливу вітру на ефективність алгоритмів побудови траєкторій безпілотних літальних апаратів та розробка методів компенсації зовнішніх факторів

(Liutfaliiev E. G.) Analysis of wind influence on the efficiency of trajectory planning algorithms for unmanned aerial vehicles and development of external factor compensation methods

67

РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА / ELECTRONIC WARFARE

Довгополий А. С., Білобородов О. О., Петрук С. М., Пантелеєв С. Б. Аналіз застосування технологій супутникової навігації у військовій сфері

(Dovhopoly A. S., Biloborodov O. O., Petruk S. M., Panteleiev S. B. Analysis of the application of satellite navigation technologies in the military sphere)

75

Сащук С. І., Слюсар В. І., Шелемін З. К., Дрогозов К. В. Тенденції еволюційних змін у приймачах сигналів супутникових радіонавігаційних систем високоточних засобів повітряного нападу

(Saschuk S. I., Slyusar V. I., Shelemin Z. K., Drogozov K. V. Evolutionary trends in satellite radio navigation signal receivers for high-precision airborne weapon systems)

87

ТЕХНІКА ТА ОЗБРОЄННЯ ВІЙСЬКОВО-МОРСЬКИХ СИЛ / NAVY ARMAMENT & EQUIPMENT

Савельєв Ю. В., Марковська Л. А., Гончар О. М., Олійник К. А., Шульженко Є. О. Нові технології комплексного захисту військових об'єктів

(Savelyev Yu. V., Markovskaya L. A., Gonchar O. M., Oliinyk K. A., Shulzhenko Eu. O. New technologies for comprehensive protection of military facilities)

96

Кацан А. М., Бунтов А. Ю. Гіперзвукові протикорабельні ракети: реальні переваги, обмеження та умови бойової ефективності на морі

(Katsan A. M., Byntov A. Yu. Hypersonic anti-ship missiles: real advantages, limitations, and conditions for combat effectiveness at sea)

105

Лейко О. Г., Кочарян О. О., Позднякова О. М. Порівняльні характеристики ефективності гідроакустичних станцій з гнучкими протяжними гідроакустичними антенами при експлуатації їх в глибоких морях і в присутності морської поверхні

(Leiko O. G., Kocharian O. O., Pozdniakova O. M. Comparative characteristics of the efficiency of hydroacoustic stations with flexible extended hydroacoustic antennas when using them in deep seas and in the presence of the sea surface)

111

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ / INFORMATION SYSTEMS

Петров В. В., Антонов Є. Є., Зенін В. М., Мілевський В. Є. Моделювання оптичних параметрів спеціалізованої плоско-фокусувальної оптики

(Petrov V. V., Antonov E. E., Zenin V. N., Milevskiy V. E. Simulation of the optical parameters of specialized flat-focusing optics)

116

Rakhmaniy O. M., Bazarniy S. V., Ternoviy O. V. Analytical parameters of the decision-making process concept in a multidomain conflict

(Рахманій О. М., Базарний С. В. Терновий О. В. Аналітичні параметри концепції процесу прийняття рішень в умовах багатодоменого протистояння)

125

ЖИВУЧІСТЬ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ / SURVIVABILITY

Заліско І. І., Гімбер С. М. Системний аналіз і методологія оптимізації мобільних кранів на автомобільному шасі для умов активних бойових дій: структурна надійність, балістичний захист і живучість

(Zalisko I. I., Himber S. M. System analysis and optimization methodology for mobile cranes on truck chassis in active combat conditions: structural reliability, ballistic protection and survivability)

131

УДК 355.623:519.87

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).4-14](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).4-14)

В. М. МОЖАРОВСЬКИЙ, доктор військових наук
професор
<https://orcid.org/0000-0003-3542-5472>

В. В. ЗУБАРЕВ, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4998-726X>

А. О. ВЕРЕТНОВ, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0003-0160-7325>

Б. О. МЕЛЬНИК, кандидат технічних наук
старший дослідник
<https://orcid.org/0000-0002-5635-0099>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІЙСЬК

У статті розглянуто методологічні основи системного дослідження ефективності технічного забезпечення військ як складної організаційно-технічної системи військового призначення. Обґрунтовано, що технічне забезпечення військ функціонує в умовах динамічної зміни бойової обстановки, впливу зовнішнього середовища, невизначеності та ресурсних обмежень, що визначає необхідність застосування системного підходу до аналізу його структури, взаємозв'язків і процесів функціонування.

Показано, що використання системного підходу дозволяє формалізувати процеси функціонування системи технічного забезпечення військ, визначити взаємодію її елементів, сформувати ієрархію взаємопов'язаних систем та обґрунтувати основні напрями підвищення ефективності функціонування. Сформовано системний образ процесу технічного забезпечення через взаємопов'язані характеристики входу, структури, обмежень та виходу системи.

Запропонований підхід передбачає розгляд системи технічного забезпечення як адаптивної організаційно-технічної системи військового призначення, функціонування якої здійснюється в умовах стохастичності, нестаціонарності та динамічної зміни бойової обстановки. Визначено місце системи технічного забезпечення в загальній структурі організаційно-технічних систем військового призначення та встановлено ієрархічні взаємозв'язки між системами різних рівнів.

Обґрунтовано, що застосування системного підходу створює наукову основу для подальшого розвитку математичних та імітаційних моделей, систем підтримки прийняття рішень, цифрових двійників

(Digital Twin), технологій технічного обслуговування за технічним станом (CBM+), предиктивної аналітики та інтелектуальних систем управління технічним забезпеченням військ.

Ключові слова: відновлення, технічне забезпечення, ефективність, організаційно-технічна система, системний підхід, математичне моделювання, цифровізація, системи підтримки прийняття рішень, Digital Twin, CBM+, експлуатація озброєння та військової техніки.

ВСТУП

Сучасний характер збройної боротьби, що визначається високою інтенсивністю бойових дій, широким застосуванням високотехнологічних засобів ураження та динамічністю зміни обстановки, обумовлює зростання ролі технічного забезпечення військ як одного з ключових факторів підтримання їх боєздатності. У цих умовах ефективність функціонування військових формувань значною мірою залежить від здатності системи технічного забезпечення своєчасно відновлювати озброєння та військову техніку, підтримувати їх у справному стані та забезпечувати безперервність виконання бойових завдань.

Довід ведення бойових дій на території України у 2022–2026 роках засвідчив критичну залежність ефективності бойового застосування військ від спроможностей систем технічного забезпечення щодо своєчасного відновлення зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), управління потоками пошкоджених зразків ОВТ, забезпечення запасними частинами та організації ремонтно-відновлювальних процесів в умовах високої інтенсивності бойових дій [1, 2].

Технічне забезпечення військ є складним багатокomпонентним процесом, що реалізується в умовах невизначеності, обмеженості ресурсів та впливу значної кількості внутрішніх і зовнішніх факторів. Воно включає взаємопов'язані процеси технічного обслуговування, ремонту, евакуації, технічної розвідки, матеріально-технічного забезпечення тощо, які функціонують у межах єдиної організаційно-технічної системи військового призначення.

Особливістю функціонування системи технічного забезпечення є її тісний взаємозв'язок із процесами бойового застосування військ, що зумовлює необхідність розгляду її не ізольовано, а як складової частини ієрархічної системи вищого рівня. Такий підхід дозволяє враховувати вплив надсистеми на формування вимог до ефективності функціонування підсистем, а також забезпечує узгодженість цілей та критеріїв оцінювання.

У зв'язку з цим актуальним є застосування системного підходу до аналізу технічного забезпечення військ, який дозволяє формалізувати структуру та процеси функціонування системи, визначити взаємозв'язки між її елементами та обґрунтувати шляхи підвищення ефективності. Використання системного підходу створює можливість переходу від описового аналізу до формалізованого моделювання, що є необхідною умовою прийняття обґрунтованих управлінських рішень у військовій сфері [3–4].

У сучасних умовах розвитку цифрових технологій, систем підтримки прийняття рішень, концепцій Digital Twin, СВМ+, предиктивної аналітики та штучного інтелекту [6–10] особливої актуальності набуває формалізація структури та процесів функціонування систем технічного забезпечення військ як складних організаційно-технічних систем військового призначення.

Побудова таких цифрових та інтелектуальних систем неможлива без створення відповідної системно-методологічної основи, формалізації взаємозв'язків між елементами системи, визначення характеристик входу, структури, обмежень та критеріїв ефективності функціонування.

Метою статті є формування методологічних основ системного дослідження ефективності технічного забезпечення військ як складної організаційно-технічної системи військового призначення шляхом формалізації її структури, взаємозв'язків, характеристик функціонування та визначення наукової основи подальшого математичного, імітаційного та цифрового моделювання процесів технічного забезпечення військ.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Технічне забезпечення Сухопутних військ є однією з визначальних складових системи забезпечення бойових дій, яка здійснює суттєвий і багатовимірний вплив на їх хід та кінцеві результати. Воно охоплює комплекс взаємопов'язаних заходів, спрямованих на підтримання, відновлення та нарощування боєздатності зразків озброєння і військової техніки, включаючи технічне обслуговування, ремонт, евакуацію пошкоджених зразків, постачання запасних частин, агрегатів і матеріальних ресурсів, а також технічну розвідку та оцінку технічного стану [11–15].

У сучасних умовах технічне забезпечення військ являє собою складний процес, що складається з декількох підпроцесів, які реалізуються на всіх рівнях структури військ спеціальними силами і засобами, що функціонують на основі визначених вимог, норм і настанов. Складність технічного забезпечення визначається тим, що цей процес, як і бойове застосування військ, протікає в різних динамічних «ситуаціях». Ці «ситуації» визначаються видом бойових дій, характеристиками театру воєнних дій, можливостями своїх військ і противника, умовами навколишнього середовища. Вони можуть змінюватися у ході бойових дій. У результаті виникають стохастичність і нестационарність розглянутих процесів, що в кінцевому підсумку визначає їх складність на відміну від стаціонарних, детермінованих (простих) процесів. Бойові дії на території України підтвердили, що ефективне функціонування систем технічного забезпечення потребує забезпечення їх адаптивності, стійкості та здатності до оперативного реагування на швидкоплинні зміни бойової обстановки, масоване застосування безпілотних систем та високоточних засобів ураження.

Проведений аналіз ведення бойових дій на території України підтвердив, що традиційні підходи до організації технічного забезпечення не завжди забезпечують необхідний рівень оперативності, адаптивності та

стійкості функціонування систем відновлення зразків ОВТ [1, 2] в умовах високої інтенсивності бойових дій, масованого застосування безпілотних авіаційних комплексів, високоточної зброї та постійного маневру військ. У зв'язку з цим виникає необхідність переходу до більш гнучких, адаптивних та інформаційно-інтегрованих систем технічного забезпечення, функціонування яких повинно базуватись на сучасних методах системного аналізу, математичного моделювання та цифровізації процесів управління.

Відмінною особливістю технічного забезпечення військ, як і будь-якого виду бойової діяльності, є те, що цей процес реалізується в повному обсязі лише в періоди бойових дій військ, що породжує труднощі у формуванні та розробленні шляхів підвищення ефективності (якості) цього процесу.

Для аналізу системи технічного забезпечення доцільно застосувати сучасну загальнонаукову методологію – аналіз і синтез великих систем. Питанням аналізу і синтезу великих систем або системного підходу присвячено значну кількість робіт. Найбільш відомими з них є роботи [3–5, 13–17]. Сутність і основні положення такого підходу в дослідженнях полягають в наступному.

Системна методологія виникла як інструмент логічного аналізу діяльності складних соціальних, військових або виробничих організацій, формальний (математичний) опис яких є достатньо складним і при спрощенні не дає бажаних результатів.

У сучасних умовах системна методологія набуває нового значення як наукова основа цифрової трансформації військових систем, створення інтегрованих інформаційно-аналітичних середовищ, систем підтримки прийняття рішень та цифрових платформ управління життєвим циклом озброєння і військової техніки.

Метою такого аналізу є вибір управлінських рішень керівництва для управління організаціями – організаційно-технічними системами або прийняття найбільш доцільних рішень під час їх проектування (модернізації).

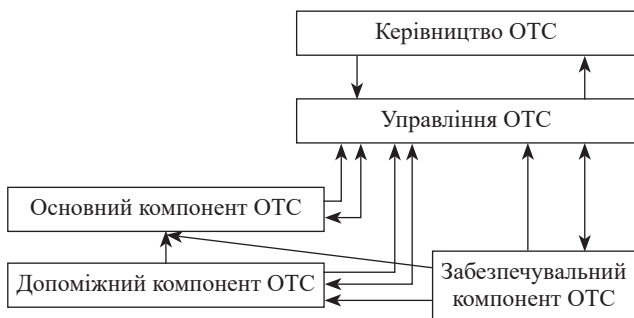
Під системою розуміється організована сукупність компонентів (технічні вироби, персонал і витратні матеріали), призначених для виконання визначеної мети (цілей). Вона функціонує в заданих умовах на основі встановлених принципів і правил.

Досліджувана система розглядається не ізольовано, а як складова частина (компонент) системи вищого рівня. Тим самим для кожної досліджуваної системи вводиться поняття надсистеми (системи вищого рівня). Вона функціонує у визначених умовах і на основі встановлених принципів та правил. Як складову частину (компонент) системи вищого рівня, досліджувану систему доцільно розглядати в ієрархії систем.

Залежно від призначення системна методологія класифікує компоненти систем (системи) на основні, допоміжні, забезпечувальні та керуючі. Типові компоненти притаманні всім системам такого роду. У сучасних умовах такі компоненти повинні розглядатися як адаптивні та інформаційно-інтегровані елементи організаційно-технічної системи, здатні функціонувати в умовах динамічної зміни обстановки, дефіциту ресурсів та високого рівня невизначеності. Кожний із них реалізує

основний, допоміжний, забезпечувальний або управлінський процес у ході функціонування системи. При цьому, при розгляді складних багатофункціональних систем (організаційно-технічної системи) призначення компонента може змінюватися залежно від функції, що виконується системою в даній ситуації.

Як приклад можна навести структуру машинобудівного підприємства [18], де є основні цехи, що виконують процес складання машин; допоміжні цехи, які виготовляють деталі для складання; служби головного механіка, що забезпечують основний і допоміжний процеси; а також ряд відділів, що здійснюють управління виробничим процесом підприємства. Загальні цілі діяльності підприємства і політика їх досягнення виробляються керівництвом. Структура такої типової системи (організаційно-технічної) представлена на рис. 1.



Р и с . 1. Структура типової системи

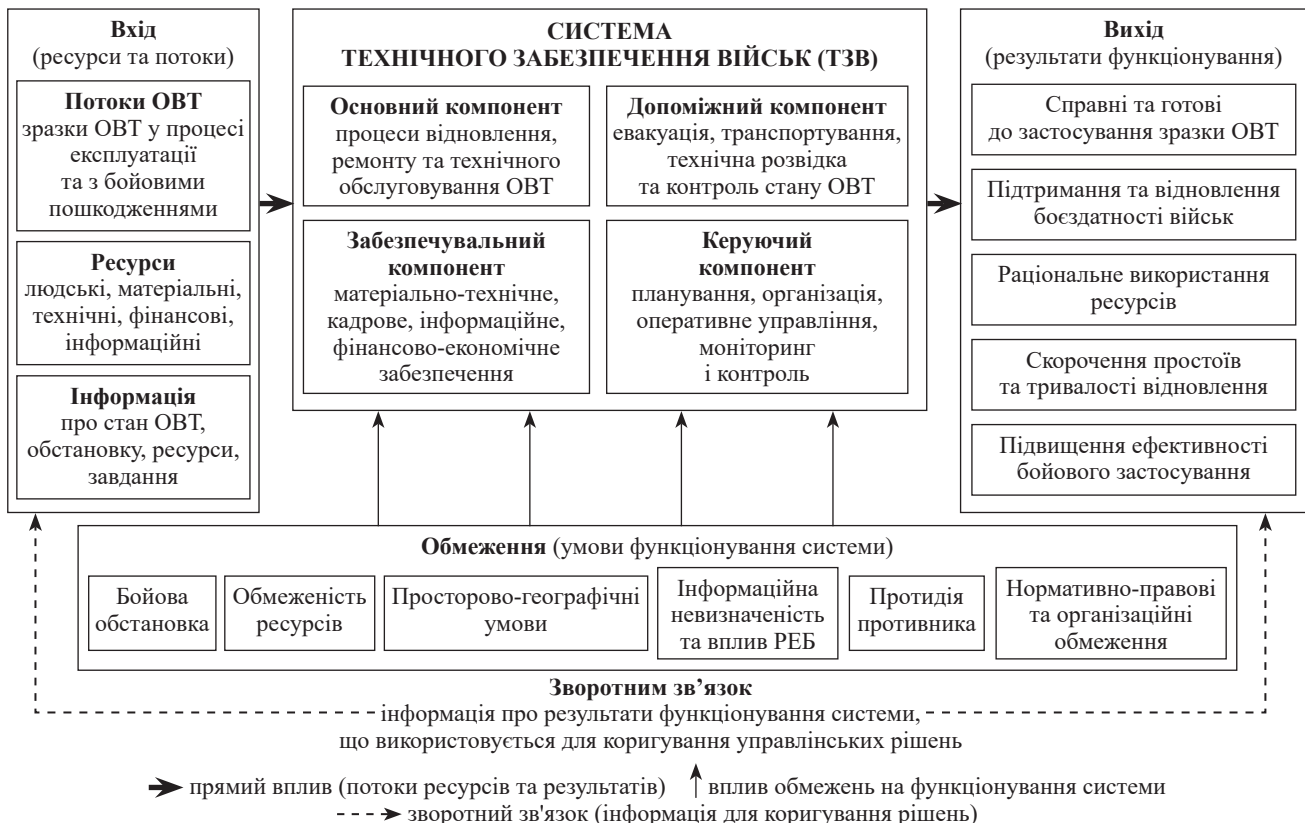
Аналогічну структуру мають організації військового призначення. Наприклад, у механізованій бригаді основним компонентом є механізовані батальйони, які

безпосередньо виконують бойові завдання. Допоміжним компонентом виступають танковий батальйон, артилерійські підрозділи, підрозділи протиповітряної оборони, розвідки та інженерного забезпечення, що забезпечують підвищення бойових можливостей основних сил. Забезпечувальним компонентом є підрозділи матеріально-технічного забезпечення, ремонтно-відновлювальні підрозділи, підрозділи тилового забезпечення, медичні та транспортні підрозділи, які підтримують функціонування бригади на необхідному рівні боєздатності. Усі ці компоненти інтегруються та координуються органами управління і командування бригади на чолі з командиром бригади.

Аналогічну, чітко виражену структуру мають армійські корпуси і окремі полки. З деякими припущеннями з цих позицій можна розглядати військові системи більш низького рівня.

У системах вищого рівня формуються вимоги до функціонування систем нижчого рівня. Різниця між необхідними і фактичними значеннями показників виконуваного системою процесу породжує проблему. Ця проблема формулюється як необхідність підвищення ефективності або якості функціонування системи.

Виявлення проблеми і пошук переважного її вирішення здійснюються шляхом відбору і систематизації всіх факторів, що впливають на функціонування системи, аналізу їх взаємозв'язків і оцінювання впливу на показники процесу. Для цього розробляється так званий системний образ досліджуваного процесу (рис. 2). Кожний процес, що протікає в системі, може бути представлений у вигляді функціональної моделі типу «чорної скриньки», яка характеризується наявністю входу,



Р и с . 2. Системний образ процесу функціонування системи ТхЗ

виходу, внутрішньої структури та системи обмежень функціонування. Такий підхід дозволяє формалізувати процеси функціонування організаційно-технічних систем військового призначення та створює основу для подальшого математичного, імітаційного й цифрового моделювання систем технічного забезпечення військ.

Характеристиками входу в загальному випадку є кількість, якість і вартість потоків об'єктів, ресурсів та інформації, що надходять до системи; характеристиками структури – кількість, якість і вартість елементів системи, які забезпечують реалізацію її функцій; характеристиками обмежень – режими функціонування системи більш високого рівня, умови навколишнього середовища, а також принципи і правила функціонування досліджуваної системи. Показниками виходу є кількість, якість і вартість результатів функціонування системи, а також різні похідні від цих показників (відносні, середні та питомі показники).

Якщо показники виходу не задовольняють необхідним значенням (рис. 2), виникає необхідність підвищення ефективності процесу. Вона може бути вирішена зміною характеристик входу, структури і обмежень досліджуваної системи, у тому числі характеристик її підсистем. Вибір рішень знаходиться у сфері характеристик, що піддаються цілеспрямованій зміні, тобто є керованими.

Вибір переважного (оптимального) рішення ґрунтується на експертних оцінках фахівців, на аналізі даних функціонування систем-аналогів, на пасивному або активному (цілеспрямований вибір експериментальних точок) спостереженні за функціонуванням досліджуваної системи, на фізичному або математичному моделюванні її функціонування. У сучасних умовах такі підходи все більше доповнюються цифровими технологіями під-

тримки прийняття рішень, методами математичного та імітаційного моделювання, засобами предиктивної аналітики та елементами штучного інтелекту [6–10].

В умовах обмеження ресурсів оптимальне рішення слід шукати у координатах «ефективність – вартість». На рис. 3 подано кілька можливих шляхів переходу системи з рівня ефективності E_0 на заданий рівень $E_{п}$. Оптимальним є шлях A_1 , що дозволяє досягти необхідного рівня з мінімальними витратами.

Системна методологія як світогляд дослідника дозволяє вивчати процеси і явища в їх діалектичній єдності. Не втрачаючи цілісності процесу, ця методологія дозволяє типізувати структури, їх елементи, характеристики процесу і вимоги до нього. Завдяки цьому виникає можливість застосовувати типові методи аналізу до різноманітних за природою систем і типові правила вибору переважних (оптимальних) рішень, розглядати в єдності ряд ієрархічних процесів і систем.

Універсальність системної методології дозволяє застосовувати її при вирішенні військово-технічних проблем, зокрема проблеми підвищення ефективності технічного забезпечення військ на різних рівнях (тактичних, оперативних, стратегічних), які в подальшому будемо називати організаційно-технічними системами військового призначення (далі – ОТС ВП).

Системний образ функціонування ОТС ВП представлений на рис. 4. Розглядається бойова ситуація – наступ.

Характеристиками входу є параметри і ознаки району ведення бойових дій і насамперед кількісні та якісні характеристики об'єктів противника, їх розподіл у часі та просторі. Ці об'єкти (цілі) розподіляються між основними і допоміжними компонентами системи при їх одночасному (паралельному) функціонуванні. Якщо ж бойове забезпечення є попереднім етапом функціону-

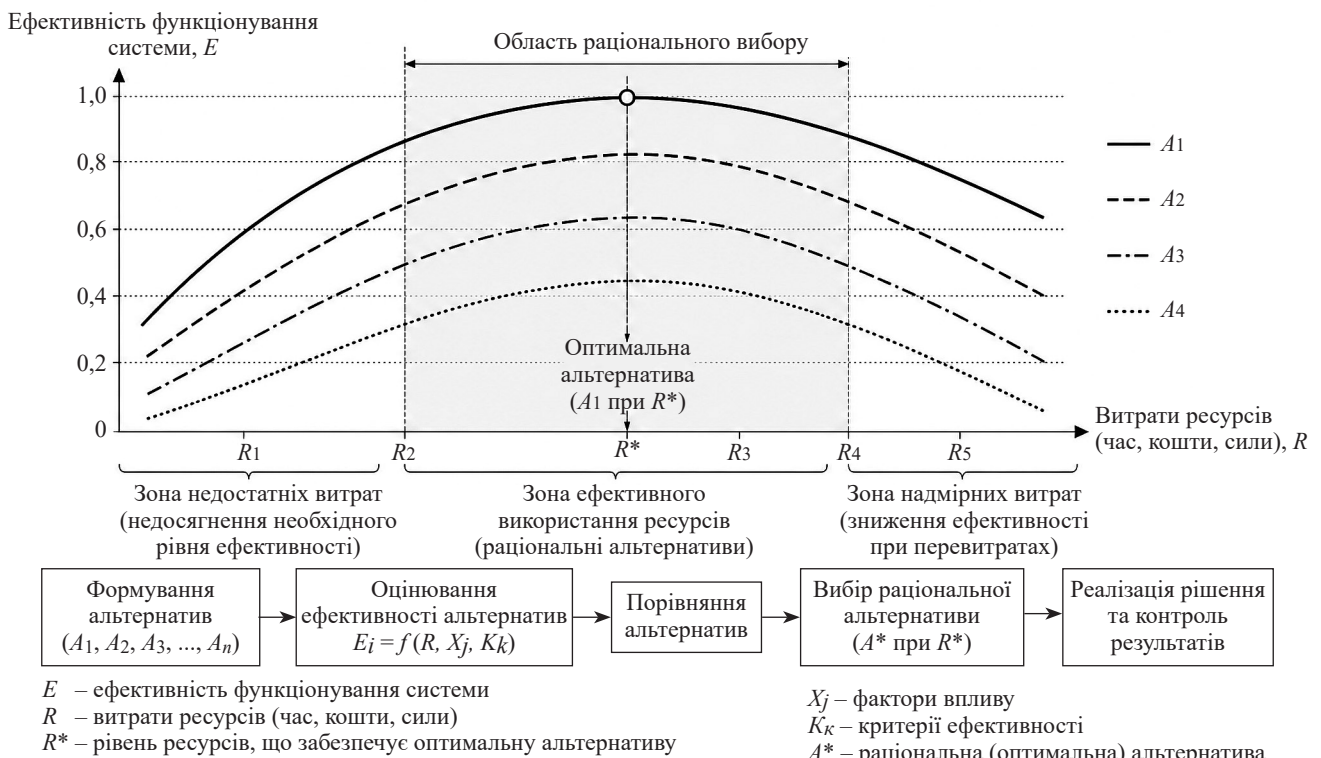
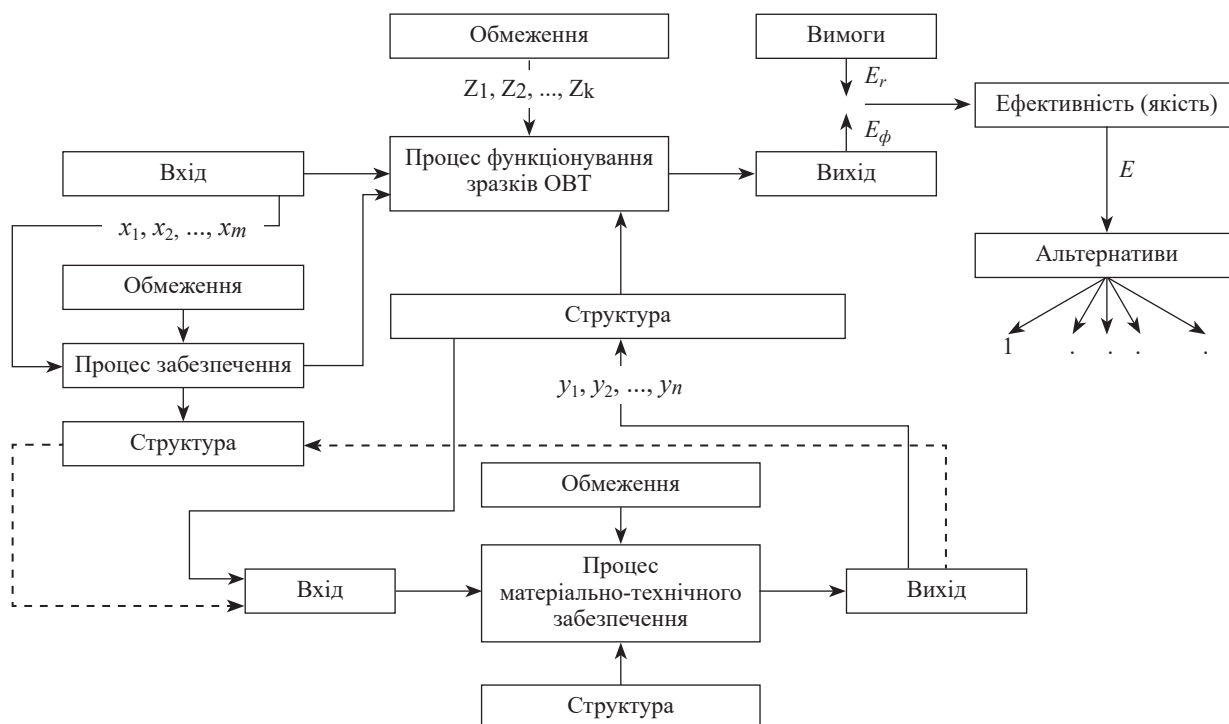


Рис. 3. Графічне представлення вибору переважної альтернативи досягнення заданої ефективності



Р и с . 4. Системний образ функціонування ОТС ВП

вання бойових зразків ОБТ, то характеристики входу «надходять» на вхід допоміжного процесу, «переробляються» там, після чого стають входом основного процесу.

Характеристиками структури бойових зразків ОБТ є їх кількість і якісні характеристики, у тому числі особовий склад і його бойові, моральні, психофізіологічні якості тощо.

Характеристиками обмежень основного процесу є принципи функціонування бойових зразків ОБТ (способи застосування), умови навколишнього середовища. Аналогічними за змістом є характеристики структури засобів бойового забезпечення і обмеження їх функціонування.

Показниками виходу основного процесу є кількість захопленого простору, час оволодіння ним, а також якісні характеристики – збиток, завданий противнику, і власні втрати. Показниками виходу допоміжного процесу є збиток, завданий противнику, і власні втрати. Тоді показниками функціонування досліджуваної системи будуть: кількість захопленого простору, час оволодіння ним, сумарні втрати противника і власних військ.

Співвідношення фактичного і потрібного ефекту визначає ефективність функціонування системи, тобто ступінь вирішення поставленого завдання у кількісному сенсі [19–21]. У ряді ситуацій може бути поставлене якісне завдання – «знищити противника». У цьому випадку завданий противнику збиток порівнюється з потрібним, у результаті чого оцінюється ступінь виконання поставленого завдання. При цьому в сучасних умовах ефективність систем технічного забезпечення повинна оцінюватися не лише за кількісними показниками результативності, а і за показниками адаптивності, стійкості функціонування, оперативності реагування та здатності системи забезпечувати підтримання технічної

готовності зразків ОБТ в умовах динамічної зміни бойової обстановки.

У загальному випадку можливі три шляхи підвищення ефективності функціонування системи:

- 1) покращення характеристик входу;
- 2) удосконалення структури;
- 3) нормалізація обмежень (маються на увазі керовані характеристики).

Ці шляхи доцільно розглядати стосовно окремих процесів.

Для основного процесу – функціонування бойових зразків ОБТ – ними є «покращення» характеристик захопленого простору, удосконалення принципів і способів застосування бойових зразків ОБТ, збільшення їх кількості або підвищення якості.

Перший шлях належить до сфери ефективності допоміжного процесу – забезпечення функціонування бойових зразків ОБТ.

Другий шлях – це стратегія і тактика бойового застосування військ.

А одним із напрямів реалізації третього шляху є удосконалення забезпечувального процесу.

Звернемося тепер до опису цього процесу. Його доцільно поділити на процеси технічного забезпечення і процеси тилового забезпечення.

Детально будемо аналізувати технічне забезпечення військ, основна мета якого полягає у підтриманні бойового потенціалу військ шляхом забезпечення наявності в строю справного озброєння і техніки, у даному випадку – бойових зразків ОБТ та інших зразків, що виконують допоміжні функції.

При цьому система технічного забезпечення повинна розглядатися не лише як елемент забезпечення бойових дій, а і як складова системи управління життєвим циклом озброєння та військової техніки, що охоплює про-

цеси експлуатації, технічного обслуговування, ремонту, відновлення, модернізації та підтримання технічної готовності ОВТ протягом усього періоду функціонування [2–5].

Систему, в якій реалізується цей процес, також можна подати як таку, що складається з трьох типових компонентів. Основним компонентом є технічне обслуговування та ремонт зразків ОВТ. Допоміжний компонент забезпечує проведення технічної розвідки, евакуації зразків ОВТ, а також їх забезпечення військово-технічним майном і запасними частинами.

Отже, система технічного забезпечення військ описується тим самим системним способом, що і система вищого порядку, яку ми умовно назвали організаційно-технічною системою (рис. 4). У свою чергу кожен компонент такої системи може бути аналогічним чином деталізований до системи нижчого порядку.

Розглянемо характеристики технічного забезпечення військ.

Згідно з рис. 4, входом процесу (системи) є потік зразків ОВТ з основного та допоміжного компонентів ОТС ВП. Характеристиками входу є кількісні і якісні характеристики зразків ОВТ, що потребують технічного забезпечення, а також їх розподіл у часі і просторі.

Кількість зразків ОВТ, що переходять у систему технічного забезпечення, буде залежати від їх захищеності, довговічності, безвідмовності та інших властивостей. Якісними характеристиками зразків ОВТ, що надходять у систему, будуть евакопридатність, ремонтпридатність (відновлюваність), місцезнаходжуваність (властивість, що реалізується під час проведення технічної розвідки), транспортабельність.

Характеристиками забезпечувальної структури будуть кількісні і якісні характеристики технічних засобів та кількісні і якісні характеристики особового складу.

Наприклад, збільшення кількості евакуаційних засобів у складі ремонтно-відновлювального підрозділу дозволяє скоротити середній час евакуації пошкоджених зразків ОВТ із районів ведення бойових дій, що безпосередньо впливає на зменшення часу відновлення та підвищення коефіцієнта технічної готовності військової техніки.

Характеристиками обмежень є перелічені обмеження застосування ОТС ВП, а також принципи і способи технічного забезпечення військ.

Показниками виходу процесу будуть кількість повернутих до бойових порядків зразків ОВТ, тривалість, трудомісткість і вартість їх технічного забезпечення (якісні показники) та їх різні похідні. Як показано на рис. 4, потік обслуговуваних зразків ОВТ надходить до основної та допоміжної структур ОТС ВП.

Зазвичай задаються вимоги до ефективності технічного забезпечення зразків ОВТ. Якщо фактична ефективність нижча за необхідну, то виникає проблема. Як і для системи вищого рівня, тут існують три основні шляхи її вирішення:

- 1) поліпшення характеристик зразка ОВТ (характеристик входу);
- 2) удосконалення забезпечувальної структури (технічних засобів, особового складу та їх організації);

3) зміна обмежень, зокрема принципів і способів технічного забезпечення зразків ОВТ. Кожен із цих шляхів складається з ряду часткових рішень.

Таким чином, ми отримуємо ієрархію взаємопов'язаних систем і відповідно ієрархію проблем ефективності їх функціонування. Формування такої ієрархії взаємопов'язаних систем створює можливість побудови багаторівневих моделей управління технічним забезпеченням військ, у тому числі із застосуванням сучасних інформаційно-аналітичних систем та технологій підтримки прийняття рішень. На будь-якому рівні проблема ефективності має три напрями розв'язання, кожен з яких складається з ряду шляхів (підпроблем). Одним із таких шляхів є проблема ефективності функціонування нижчої системи.

На рис. 5 наведено ієрархію проблем ефективності функціонування ОТС як типової військової системи. Детально розкрито гілку проблем технічного забезпечення. Відповідно до рисунку, проблема ефективності технічного забезпечення є проблемою другого рівня відносно проблеми ефективності бойового застосування ОТС ВП. Вона входить до переліку питань, розроблення яких повинно забезпечити необхідні для розв'язання вищої проблеми кількісні та якісні характеристики зразків озброєння і техніки ОТС ВП. Інакше кажучи, ефективність технічного забезпечення є проблемою одного рівня з проблемами бойових властивостей зразків ОВТ, тобто ці проблеми мають однакове значення і є проблемами другого рівня.

У свою чергу ефективність технічного забезпечення визначається також трьома напрямками, кожен з яких поділяється на окремі шляхи. Наприклад, проблема кількості та якості зразків ОВТ, що потребують технічного забезпечення, визначається їх експлуатаційно-ремонтними характеристиками, а одним із шляхів удосконалення структури системи технічного забезпечення є підвищення ефективності, наприклад, системи постачання майном і запасними частинами. У цьому випадку це проблеми третього рівня.

Різноманіття шляхів вирішення основної проблеми в умовах обмеженості ресурсів потребує обґрунтованого вибору переважної альтернативи. Звичайно, це завдання можна виконати неформальним шляхом на основі логічного аналізу дерева проблем і визначення значущості кожної з них групою експертів. Однак поряд із таким підходом доцільно забезпечувати більш об'єктивне вирішення проблеми на основі математичного опису функціонування системи.

Використовуючи системний образ, представлений на рис. 4, покажемо аналітичний опис процесу функціонування системи (компонента системи).

Характеристики входу подамо у вигляді множини X , так що $x_i \in X$; характеристики структури – у вигляді множини Y ($y_j \in Y$) та характеристики обмежень – у вигляді множини Z ($z_k \in Z$). Тоді фактичний ефект функціонування визначатиметься

$$E\phi = f(X, Y, Z). \quad (1)$$

Для систем технічного забезпечення військ множина X може включати інтенсивність надходження пошкодже-

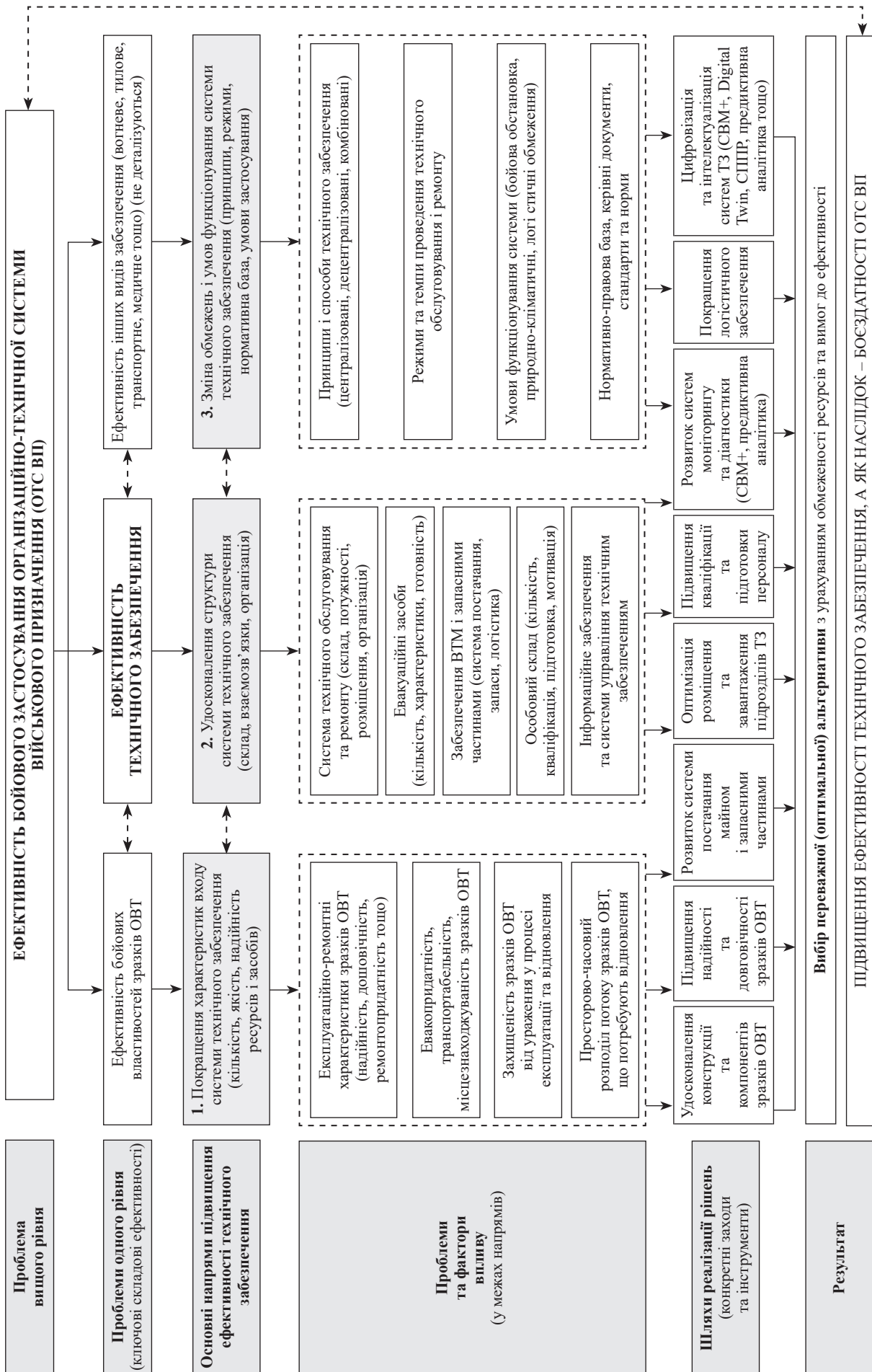


Рис. 5. Ієрархія проблем ефективності функціонування організаційно-технічної системи військового призначення

них зразків ОВТ, ступінь їх пошкодження, просторово-часовий розподіл потоку заявок на відновлення, множина Y – характеристики ремонтно-відновлювальних органів, евакуаційних засобів, запасів військово-технічного майна, чисельності та кваліфікації персоналу, а множина Z – часові, ресурсні, бойові, логістичні, природно-кліматичні обмеження функціонування системи тощо.

Вимоги задаються із вищої системи у вигляді заданого ефекту E_T (потрібного результату). Тоді ефективність функціонування системи E виражається як

$$E = \frac{E_\phi}{E_T}. \quad (2)$$

Зазначимо, що в загальному вигляді математичні моделі (1) і (2) є справедливими для оцінювання ефективності систем на будь-якому рівні. Зазначимо також, що ефективність системи нижчого $(n + 1)$ порядку є аргументом у моделі вищої системи n -го порядку, тобто

$$E_{n+1} = y_n, \quad (3)$$

де E_{n+1} – ефективність системи $(n + 1)$ -го порядку, y_n – аргумент моделі системи n -го порядку.

Системи бувають мультиплікативними, адитивними, змішаними.

Мультиплікативні системи складаються з ряду послідовно функціонуючих компонентів, наприклад, основного і допоміжного у розглянутих нами військових системах. Ефективність такої системи визначається як добуток ефективностей її компонентів

$$E_A = \prod_{i=1}^n E_i. \quad (4)$$

Адитивні системи складаються з паралельно функціонуючих компонентів. Ефективність такої системи є сумою ефективностей її окремих компонентів

$$E_A = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (5)$$

Усі військові системи, у тому числі система технічного забезпечення, є змішаними. Їх ефективність визначається комбінацією виразів (4) і (5). Отже, системний підхід до аналізу систем дозволяє типізувати військові системи на будь-якому рівні та встановити їх взаємозв'язки. Завдяки цьому виникає можливість скласти «дерево» цілей або проблем для кожної системи. Це показано на прикладі системи технічного забезпечення.

Вибір оптимального (переважного) шляху підвищення ефективності системи базується на розробленні та аналізі її математичної моделі. У математичній моделі повинні бути враховані характеристики входу, структури та обмежень функціонування системи. Формалізація процесів функціонування систем технічного забезпечення створює передумови для подальшого створення систем підтримки прийняття рішень, цифрових двійників організаційно-технічних систем військового призначення та інтелектуальних систем прогнозування технічного стану зразків ОВТ.

Наукова новизна статті полягає у формуванні системно-методологічного представлення технічного забезпечення військ як багаторівневої організаційно-

технічної системи, формалізації взаємозв'язків між характеристиками входу, структури та обмежень функціонування системи, а також створенні концептуальної основи подальшого математичного моделювання, цифровізації та інтелектуалізації систем технічного забезпечення військ.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання під час розроблення методів оцінювання ефективності технічного забезпечення військ, формування перспективних структур ремонтно-відновлювальних органів, побудови систем підтримки прийняття рішень, а також під час створення цифрових моделей організаційно-технічних систем військового призначення.

ВИСНОВКИ

У статті обґрунтовано доцільність розгляду технічного забезпечення військ як складової організаційно-технічної системи військового призначення, функціонування якої здійснюється в ієрархії взаємопов'язаних систем різних рівнів. Показано, що застосування системного підходу дозволяє формалізувати процес технічного забезпечення у вигляді системного образу «вхід–структура–обмеження–вихід», що створює методологічну основу для комплексного аналізу факторів, які визначають ефективність функціонування системи в умовах стохастичності та нестационарності.

Встановлено, що підвищення ефективності технічного забезпечення досягається шляхом впливу на характеристики об'єктів, що надходять у систему, параметри її забезпечувальної структури та умов функціонування. Обґрунтовано, що вибір раціональних рішень має базуватися на використанні математичних моделей, які враховують зазначені фактори, що створює передумови для подальшого розвитку методів оцінювання ефективності та оптимізації систем технічного забезпечення військ.

Запропонований підхід створює наукову основу для подальшого розвитку математичних моделей функціонування систем технічного забезпечення військ, побудови імітаційних моделей, інтеграції технологій цифрових двійників, систем підтримки прийняття рішень, технологій СВМ+ та засобів штучного інтелекту для прогнозування технічного стану зразків ОВТ.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Інформаційний бюлетень з питань вивчення досвіду застосування сил логістики. Командування Сил логістики ЗС України. 2024. Київ. 101 с.
2. Проміжний звіт про НДР, шифр «Моніторинг-СВ» / Ларін О.Ю., Почечун О.О., Веретнов А.О. та ін. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2025.
3. Ковтуненко А. П., Шишанов М. О., Зубарев В. В. Основы теории восстановления эксплуатационных свойств технических систем: монография. Київ: НАУ. 2007. 296 с.
4. Ковтуненко А. П. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 3. Синтез систем технического обеспечения эксплуатации и ремонта вооружения и военной техники / под ред. А. П. Ковтуненко. Киев: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2012. 424 с.

5. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 12. Научные основы системного подхода при решении задач восстановления вооружения и военной техники / Чепков И. Б., Лапицкий С.В., Шишанов М.А., Веретнов А.А. та ін.; под ред. И. Б. Чепкова. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2022. 303 с.
6. NATO. NATO Logistics Handbook. Brussels: NATO Headquarters. 2012. 427 p.
7. Department of Defense. Condition Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook. Washington: U.S. Department of Defense. 2021. 214 p.
8. Grieves, M. & Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer. 2017. Pp. 85—113.
9. Department of the Army. Army Sustainment. Predictive Maintenance and Logistics Support in Multi-Domain Operations. Army Sustainment Magazine. 2023. Vol. 55(2). Pp. 14—21.
10. RAND Corporation. Logistics and Sustainment for Future Military Operations. Santa Monica: RAND. 2021. 186 p.
11. Дачковський В.О., Овчаренко І.В. Застосування підрозділів та військових частин технічного забезпечення. Ч. 2. Київ: НУОУ. 2018. 80 с.
12. Дачковський В.О., Овчаренко І.В. Оперативні розрахунки завдань технічного забезпечення (методика та приклади). Київ: НУОУ. 2018. 115 с.
13. Розвиток теорії матеріально-технічного забезпечення військ: монографія / Романченко І.С., Шуєнкін В.О., Трегубенко С.С., Марко І.Ю. та ін. Львів: НАСВ. 2019. 650 с.
14. Розвиток теорії відверненого збитку: монографія / В.М. Можаровский, С.В. Годзь, В.О. Шуєнкін, В.М. Власюк та ін.; під ред. В. О. Шуєнкіна. Київ: ЦНДІ ЗСУ. 2026. 300 с.
15. Романченко І.С., Шуєнкін В.А., Марко І.Ю. Теоретичні основи аналізу, моделювання та синтезу системи матеріально-технічного забезпечення як просторово-розподіленої системи. Київ: ЦНДІ ЗС України. 2013. 221 с.
16. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука. 1978. 400 с.
17. Квейд Е. Анализ складных систем. Переклад з англ. М.: Советское радио. 1969. 517 с.
18. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: СПб. ун-т. 2007. 276 с.
19. Барабаш Ю.Л. Основы теории оценивания эффективности складных систем. Київ: НУОУ. 1999. 40 с.
20. Коцюруба В.І. Методика оцінювання ефективності функціонування системи відновлення озброєння та військової техніки. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2020. № 1(37). С. 5—14.
21. Чобиток В.А. Оценка боевой эффективности и технического совершенства вооружения и военной техники: учеб. пособие. Киев: Киевское высшее танковое училище им. И.И. Якубовского. 1984. 320 с.
22. Employment during the Kursk Operation. Command of the Logistics Forces of the Armed Forces of Ukraine]. К. 2024. 101 p.
23. O.Yu. Larin, O.O. Pochechun, A.O. Veretnov et al. “Promizhnyi zvit pro NDR, shyfr «Monitoring-SV»” [Interim Research Report, code name «Monitoring-SV»] / К.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 2025.
24. Kovtunenکو, A.P., Shyshanov, M.O. & Zubarev, V.V. (2007). “Osnovy teorii vosstanovleniia ekspluatatsionnykh svoistv tekhnicheskikh system: monographiia” [Fundamentals of the Theory of Restoration of Operational Properties of Technical Systems: Monograph]. К.: Nat. Aviation Univ. 296 p.
25. Kovtunenکو, A.P. (2012). “Osnovy voenno-tekhnicheskikh issledovaniia. Teoriia i prilozheniia. T. 3. Syntez system tekhnicheskogo obespecheniia ekspliatatsii i remonta vooruzheniia i voennoi tekhniki” [Fundamentals of Military-Technical Research. Theory and Applications. Vol. 3. Synthesis of Technical Support Systems for the Operation and Repair of Weapons and Military Equipment], ed. by A.P. Kovtunenکو. К.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 424 p.
26. Chepkov, I.B., Lapytskyi, S.V., Shyshanov, M.A., Veretnov, A.A. et al. (2022). “Osnovy voenno-tekhnicheskikh issledovaniia. Teoriia i prilozheniia. T. 12. Nauchnye osnovy systemnogo podkhoda pri reshenii zadach vosstanovleniia vooruzheniia i voennoi tekhniki” [Fundamentals of Military-Technical Research. Theory and Applications. Vol. 12. Scientific Foundations of the Systems Approach in Solving Problems of Restoration of Weapons and Military Equipment], ed. by I.B. Chepkov. К.: Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 303 p.
27. NATO. NATO Logistics Handbook. Brussels: NATO Headquarters. 2012. 427 p.
28. Department of Defense. Condition Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook. Washington: U.S. Department of Defense. 2021. 214 p.
29. Grieves, M. & Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer. 2017. Pp. 85—113.
30. Department of the Army. Army Sustainment. Predictive Maintenance and Logistics Support in Multi-Domain Operations. Army Sustainment Magazine. 2023. Vol. 55(2). Pp. 14—21.
31. RAND Corporation. Logistics and Sustainment for Future Military Operations. Santa Monica: RAND. 2021. 186 p.
32. Dachkovskiy, V.O. & Ovcharenko, I.V. (2018). “Zastosuvannia pidrozdiliv ta viiskovykh chastyn tekhnichnogo zabezpechennia. Ch. 2” [Employment of Technical Support Subunits and Military Units. P. 2]. К.: Nat. Defence Univ. of Ukraine. 80 p.
33. Dachkovskiy, V.O. & Ovcharenko, I.V. (2018). “Operativni rozrakhunky zavdan tekhnichnogo zabezpechennia (metodyka ta pryklady)” [Operational Calculations of Technical Support Tasks (Methodology and Examples)]. К.: Nat. Defence Univ. of Ukraine. 115 p.

REFERENCES

1. “Informatsiyni biletyn z pytan vuvchennia dosvidu zastosuvannia syl logistyky. Komanduvannia Syl logistyky ZS Ukrainy pid chas Kurskoi Operatsii” [Information Bulletin on the Study of the Experience of Logistics Forces

13. Romanchenko, I.S., Shuienkin, V.O., Trehubenko, S.S., Marko, I.Yu. et al. (2019). "Rozvytok teorii materialno-tekhnichnogo zabezpechennia viisk: monographiia" [Development of the Theory of Logistics Support of Troops: Monograph]. Lviv: Hetman Petro Sahaidachnyi Nat. Army Acad. 650 p.
14. Mozharovskyi, V.M., Hodz, S.V., Shuienkin, V.O., Vla-siuk, V.M. et al. (2026). "Rozvytok teorii vidvernenogo zbytku: monographiia" [Development of the Theory of Prevented Damage: Monograph], ed. by V.O. Shuienkin. Central Research Inst. of the Armed Forces of Ukraine. K. 300 p.
15. Romanchenko, I.S., Shuienkin, V.A. & Marko, I.Yu. (2013). "Teoretychni osnovy analizu, modeliuvannia ta syntezu systemy materialno-tekhnichnogo zabezpechennia yak prostoro-vo-rozpodilenoї systemy" [Theoretical Foundations of Analysis, Modeling and Synthesis of the Logistics Support System as a Spatially Distributed System]. K.: Central Research Inst. of the Armed Forces of Ukraine. 221 p.
16. Buslenko, N.P. (1978). "Modelirovanie slozhnykh system" [Modeling of Complex Systems]. M.: Nauka. 400 p.
17. Quade, E. (1969). "Analiz skladnykh system. Pereklad z angl." [Analysis for Complex Systems. Translated from English]. M.: Sovetskoe Radio. 517 p.
18. Riabinin, I.A. (2007). "Nadezhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh system" [Reliability and Safety of Structurally Complex Systems]. SPb: SPb Univ. Press. 276 p.
19. Barabash, Yu.L. (1999). "Osnovy teorii otsiniuvannia efektyvnosti skladnykh system" [Fundamentals of the Theory of Evaluating the Effectiveness of Complex Systems]. K.: Nat. Defence Univ. of Ukraine. 40 p.
20. Kotsiuruba, V.I. (2020). "Metodyka otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia systemy ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki" [Methodology for Assessing the Effectiveness of the Functioning of the System for Restoration of Weapons and Military Equipment]. Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence. No. 1(37). Pp. 5—14.
21. Chobitok, V.A. (1984). "Otsenka boevoi effektivnosti i tekhnicheskogo sovershenstva vooruzheniia i voennoi tekhniki: ucheb. posobie" [Assessment of Combat Effectiveness and Technical Excellence of Weapons and Military Equipment: Textbook]. K.: I.I. Yakubovskiy Kyiv Higher Tank School. 320 p.

Mozharovskyi V.M., Zubarev V.V., Veretnov A.O., Melyk B.O.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE SYSTEMIC STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF TROOP TECHNICAL SUPPORT

The article considers the methodological foundations of the systemic study of the effectiveness of troop technical support as a complex organizational and technical military system. It is substantiated that technical support represents a complex multilevel process functioning under conditions of dynamic changes in the operational environment, external influences and resource constraints.

Under these conditions, the application of a systemic approach to the study of troop technical support becomes particularly relevant, as it makes it possible to formalize the structure, interrelationships and functioning processes of the system, as well as to substantiate the ways of improving its effectiveness. The use of a systemic approach creates the possibility of transitioning from descriptive analysis to formalized modeling, which is a necessary condition for substantiated decision-making in the military sphere.

In the context of the development of digital technologies, decision support systems, Digital Twin concepts, Condition-Based Maintenance Plus (CBM+), predictive analytics and artificial intelligence, the formation of a systemic methodological basis for the study of troop technical support acquires special importance.

The purpose of the article is to form the methodological foundations of the systemic study of the effectiveness of troop technical support as a complex organizational and technical military system through the formalization of its structure, interrelationships and functioning characteristics, as well as through determining the scientific basis for further mathematical, simulation and digital modeling of troop technical support processes.

A systemic representation of the technical support process based on interrelated input, structure, constraints and output characteristics is proposed. Such an approach makes it possible to comprehensively analyze the factors determining the effectiveness of system functioning. Hierarchical interrelationships between systems of different levels and the place of the technical support system within the general structure of organizational and technical military systems are determined. The main directions for improving the effectiveness of troop technical support are established, including improvement of serviced object characteristics, development of the support structure and optimization of system operating conditions.

The article has a conceptual and methodological character and creates a scientific basis for the further development of mathematical and simulation models, decision support systems, digital twins and intelligent management systems for troop technical support.

Keywords: recovery, technical support, effectiveness, operation, organizational and technical system, systems approach, mathematical modeling, digitalization, decision support systems, operation of armament and military equipment.

Відомості про авторів:

Можаровський Володимир Миколайович

доктор військових наук, професор
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3542-5472>
e-mail: military.technology@icloud.com

Зубарев Валерій Володимирович

доктор технічних наук, професор
головний науковий співробітник групи ГНС

з наукового керівництва досліджень
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4998-726X>
e-mail: doctorzubarev.2016@gmail.com

Веретнов Андрій Олександрович

кандидат технічних наук
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0160-7325>
e-mail: weretnow5_5@ukr.net

Мельник Борис Олександрович

кандидат технічних наук
старший дослідник
головний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5635-0099>
e-mail: melnikboss@ukr.net

Information about the authors:**Mozharovskyi Volodymyr**

Doctor of Military Sciences, Professor
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3542-5472>
e-mail: military.technology@icloud.com

Zubarev Valerii

Doctor of Technical Sciences
Professor
Chief Researcher of the Senior Research Staff Group for
Scientific Supervision of Research
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4998-726X>
e-mail: doctorzubarev.2016@gmail.com

Veretnov Andrii

Candidate of Technical Sciences
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0160-7325>
e-mail: weretnow5_5@ukr.net

Melnyk Borys

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Chief Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5635-0099>
e-mail: melnikboss@ukr.net

Стаття прийнята до редколегії 11.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 623.1:539.3/.4:624.012.45

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).15-26](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).15-26)

О. Ю. ЛАРІН, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-6933-850X>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

М. А. МУСТАФІН
<https://orcid.org/0000-0002-9340-6223>
(Командування сил безпосереднього протиповітряного прикриття Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, м. Київ)

В. Я. КРАЙНІК

С. П. СУК
(Приватне Акціонерне Товариство «УКРГІДРОПРОЕКТ», м. Харків)

ОГЛЯД ТА КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЗАНУРЕННЯ ПЕНЕТРАТОРІВ У ПЕРЕШКОДИ (ЦІЛІ)

У статті подано системний огляд і критичний аналіз методів оцінювання занурення високошвидкісних пенетраторів у перешкоди різної природи. Визначені три базові моделі: інерційно-опірня модель Понселе, динамічно-міцнісна модель Форрестала, що спирається на уявлення теорії розширення порожнини, та енерго-балансовий підхід як інтегральна, рамкова для неоднорідних і багатошарових цілей. Проаналізовані фізичні припущення, математична структура, області придатності та обмеження для кожного з підходів. Показано, що базові моделі не є взаємозамінними, а доповнюють одна одну залежно від структури та міцності матеріалу цілі, швидкісного режиму проникнення пенетратора. Сформульовано рекомендації щодо комбінованого використання аналітичних моделей і контрольних чисельних сценаріїв у задачах оборонної інженерії та проектування систем захисту критичної інфраструктури.

Ключові слова: пенетратор, проникнення, глибина занурення, модель Понселе, модель Форрестала, теорія розширення порожнини, енерго-балансовий підхід, захисні споруди.

ВСТУП

Дослідження проникнення високошвидкісних твердих тіл у суцільні, неоднорідні та багатошарові середовища є одним з ключових напрямів розвитку сучасної механіки удару та інженерної динаміки. Зростаюча складність оборонних завдань, пов'язаних із необхідністю ураження та оцінювання стійкості інженерних

споруд, захисних конструкцій та геологічних масивів, зумовлює потребу у створенні достовірних моделей, здатних описувати рух пенетраторів у широкому діапазоні швидкостей проникнення і за умов суттєвої зміни механічних властивостей матеріалів цілей. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах застосування сучасних засобів ураження проникаючої дії, для яких характерні високі кінетичні енергії та взаємодія з конструкціями різної міцності – від слабких ґрунтів до високостійкого бетону та кристалічних порід.

Багаторічні дослідження у сфері механіки проникнення високошвидкісних пенетраторів у середовища різної природи показали, що реалістичний опис процесу проникнення передбачає урахування водночас трьох груп чинників: властивостей матеріалу цілі, кінематичних параметрів удару та механізмів руйнування й дисипації енергії. Через різноманітність цих чинників у літературі сформувалося кілька концептуальних підходів до опису проникнення, серед яких найбільш розробленими є інерційно-опірні моделі типу Понселе (Poncelet) [1], динамічно-міцнісні моделі типу Форрестал (Forrestal) [2, 3] і енерго-балансові підходи [5–7], що дозволяють інтегрувати властивості перешкоди (цілі) на всій траєкторії руху пенетратора. Кожен з цих підходів містить власний набір припущень, обмежень і математичних формулювань, що робить їх релевантними для різних класів матеріалів та швидкісних режимів.

Попри значну кількість окремих досліджень, досі відсутній цілісний порівняльний аналіз, який би одночасно охоплював строгі математичні виведення ключових моделей, оцінював їх поведінку у репрезентативному діапазоні швидкостей і міцностей матеріалів, а також формував рекомендації щодо їх практичного застосування в задачах воєнно-технічного призначення. Такий аналіз є особливо необхідним для складних задач, пов'язаних із багатошаровими структурами, у яких традиційні однорідні моделі виявляються недостатніми.

Метою цієї роботи є побудова системного, науково обґрунтованого огляду та порівняльного аналізу основних моделей проникнення високошвидкісних пенетраторів, побудованих на базі підходів: Понселе, Форрестал і енерго-балансового, із детальним математичним викладом, інтерпретацією їх фізичної природи та оцінкою областей придатності. Дослідження охоплює як класичні, так і сучасні підходи, включає аналіз кінематичних і енергетичних характеристик проникнення та формулює узагальнені рекомендації щодо вибору моделі залежно від властивостей цілі та швидкості удару. Таким чином, робота створює наукове підґрунтя для підвищення точності прикладних інженерних розрахунків і для подальшої інтеграції аналітичних моделей у чисельні методи моделювання високошвидкісних процесів.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО МОДЕЛЕЙ ПРОНИКНЕННЯ

Наукові дослідження проникнення високошвидкісних тіл у тверді, ґрунтові та багатошарові середовища мають тривалу історію та охоплюють кілька методологічно різних наукових шкіл [1, 2]. Розвиток теорії відбувався паралельно у західній, радянській/російській та змі-

шаний міжнародній традиціях, кожна з яких виробила власні підходи до математичного опису опору матеріалу, механізмів руйнування та закономірностей гальмування руху пенетратора. Узагальнення цих робіт є необхідним для створення цілісної теоретичної бази, на якій ґрунтується сучасне моделювання проникнення.

Помітний внесок у формування сучасних уявлень про проникнення у бетон та гірські породи здійснила наукова школа, побудована на роботах Форрестала.

Публікації Forrestral and Luk (1997) [2] та Forrestral, Tzou and Luk (1991) [3] стали ключовими у розробленні динамічно-міцнісної моделі на основі розширення порожнини. У цих працях було запропоновано математичні вирази, що описують силу опору з урахуванням динамічної міцності бетону та інерційних ефектів у зоні перед головною частиною пенетратора. Ці моделі стали основою для сучасних аналітичних і напіваналітичних формул проникнення у високостійкі матеріали,

Т а б л и ц я 1. Анотований огляд літературних джерел щодо моделей проникнення

Автор(и)	Короткий опис роботи	Моделі, що розглядаються	Що дозволяє досліджувати	Недоліки	Пропозиції щодо використання
Forrestral & Luk (1997), [2]	Розвиток теорії розширення порожнини для бетону	Модель Форрестала	Проникнення у бетон та породи, оцінка динамічної міцності	Потребує точного σ_c ; не описує шаруватість	Використовувати для цілей високої міцності, валідувати експериментально
Forrestral, Tzou & Luk (1991), [3]	Аналітичні формули для огівальної ГЧ у бетоні	Форрестал CE-approach	Прогноз глибини та швидкості проникнення	Чутливість до форми ГЧ та параметрів матеріалу	Використовувати як базову модель для бетонних мішеней
Anderson (2017), [4]	Узагальнюючий огляд моделей проникнення	модель Понселе, CE, EB-models	Формування класифікації моделей	Не дає нових формул	Використовувати для методологічного обґрунтування
Young (1977), [5]	Напівемпіричні рівняння Sandia	Semi-empirical	Оцінка пробивання ґрунтів та конструкцій	Обмежена універсальність	Використовувати для порівняльних оцінок
Recht & Ipson (1963), [6]	Класичні формули перфорації	Ballistic perforation	Оцінка пробиття пластин	Не застосовні до ґрунтів/бетону	Застосовувати у тонких перешкодах
Wen & Chen (2002), [7]	CE-аналіз бетону	CE-model	Динамічний опір бетону	Не враховує шаруватість	Корисно для калібрування σ_c
Jin et al. (2017), [8]	Порівняння CE-моделей з випробуваннями	CE, semi-empirical	Валідація теорії розширення порожнини	Велика розбіжність у слабких ґрунтах	Використовувати як експериментальну основу
Chen et al. (2004), [9]	Модель проникнення у породи	CE (rock)	Розрахунок проникнення у кристалічні матеріали	Спеціальні параметри для порід	Корисно у військовій геомеханіці
Li & Chen (2003), [10]	Безрозмірні формули проникнення	Scaling/ Dimensionless	Узагальнення результатів	Не розглядає ϵ -параметри руйнування	Використовувати для нормування результатів
Frew, Forrestral & Hickerson (2006), [11]	Експериментальні випробування бетонних мішеней	Форрестал validation	Валідація моделей у бетоні	Роботи у вузькому діапазоні швидкостей	Використовувати для калібрування
Sarva & Nemat-Nasser (2001), [12]	Динамічна поведінка матеріалів	Rate-sensitive models	Вплив швидкості деформації	Немає формул проникнення	Застосовувати для оцінки $\sigma_c(V)$
Понселе (1839), [1]	Класична інерційно-опірна модель	Понселе метод	Загальну картину руху у ґрунтах	Відсутність фізики руйнування	Базова модель для слабких середовищ
Александров С. Б.; Костарева Н. Б.; Моргунів М. Н. (1987) [13]	Стійкість руху проникного боєприпаса в перешкоді з урахуванням сухого тертя, виведено умови існування рівноваги та критерії стійкості	Аналітична модель сил, моментів опору та лінійний аналіз стійкості (кут атаки-кутова швидкість)	Вплив геометрії носової частини, коефіцієнта тертя та положення центра мас. Пояснення джерел розкиду глибини проникнення через орієнтаційну нестійкість (важливо для довгих пенетраторів)	Орієнтація на ґрунтоподібну перешкоду, для бетону, залізобетону потрібна адаптація закону опору. Спрощене тертя $\tau = kp$ з постійним k . Не замінює моделі проникнення типу енерго-балансових	Розширити закон навантаження для бетону, залізобетону (залежність від міцності, швидкісної чутливості, пошкодження), рахувати багат шаровість (бетон-ґрунт) та змінний контакт/ тертя

Автор(и)	Короткий опис роботи	Моделі, що розглядаються	Що дозволяє досліджувати	Недоліки	Пропозиції щодо використання
Коваль, Білик, Коцюруба, (2023), [14]	Попереднє визначення параметрів захисних конструкцій	Напівемпірична інженерна модель проникнення заряду	Оцінка глибини проникнення бойових частин ракет у ґрунтово-залізобетонні захисні шари	Не описує локальне поле напружень, тріщиноутворення, ерозію, деформацію або руйнування пенетратора	Для попереднього інженерного розрахунку захисних споруд та оцінювання сумарної захисної товщі
Мустафін, Ларін, Чепков, [15] (2025)	Авторська апробація методичного підходу до зіставлення класичних моделей проникнення	Класична інерційно-опірна модель Понселе; динамічно-міцнісна модель Форрестала; енерго-балансове формулювання	Порівнює поведінку моделей за глибиною проникнення, уповільненням швидкості та дисипацією енергії	Не містить розгорнутої експериментальної валідації	Авторська апробація порівняльної методики та як перехідне джерело між фундаментальними моделями і прикладними розрахунками захисних споруд
Мустафін, Ларін, Чепков, (2026)	Інженерна оцінка захисних рішень критичних об'єктів на основі контрольних розрахункових сценаріїв	Чисельне моделювання фугасної дії в Ansys Autodyn; чисельне моделювання пенетрації в Ansys Explicit Dynamics	Дозволяє оцінювати межі застосовності багат шарових залізобетонних захисних пакетів; розмежовувати фугасно-уламковий і пенетраційний режими	Залежить від прийнятої геометрії, матеріальних моделей, контактних умов і критеріїв руйнування	Використовувати як приклад чисельної верифікації та встановлення меж придатності захисних рішень
Ларін, Чепков, (2026)	Запропоновано модельно-орієнтований сценарно-параметричний підхід до проєктування та масштабування інженерного захисту	Сценарно-параметричний підхід; вектор параметрів інженерного рішення; КРІ-верифікація; відсічні реп-сценарії; архітектури захисту II–III рівнів	Дозволяє пов'язати результати моделювання проникнення з КРІ захисту	Не містить самостійної аналітичної моделі проникнення; не дає рівнянь гальмування пенетратора; залежить від обраної системи КРІ та сценарної класифікації загроз	Приклад практичного застосування результатів repetration-моделювання для архітектурного вибору захисту
Чепков, Ларін, (2026)	Запропоновано уніфіковану програму верифікації інженерного захисту критичних вузлів об'єктів	Програма верифікації; параметризація інженерного рішення; контроль проникнення та пробиття	Дозволяє формалізувати, як результати розрахунків проникнення	Не містить математичного опису процесу занурення	Використовувати як джерело для обґрунтування необхідності включення repetration-сценаріїв у програму інженерної доказовості

а численні експериментальні результати Frew, Forrestal and Hickerson (2006) [11] підтвердили їхню високу достовірність.

Паралельно із цими дослідженнями у міжнародній літературі формувалася більш ширша концептуальна база. Одним з найбільш систематизованих оглядів є робота Anderson (2017) [4], у якій узагальнено основні класи моделей – від класичних інерційно-опірних формул до енерго-балансових підходів та теорії розширення порожнини. Історично важливу роль відіграли праці Young (1977) [5] і Recht and Ipson (1963) [6], які створили напівемпіричні формули для оцінювання процесів пробивання та перфорації, що у подальшому широко застосовувалися у прикладній балістиці. Паралельно

дослідники Wen and Chen (2002) [7], Chen et al (2004) [9] та Jin et al (2017) [8], продемонстрували ефективність cavity-expansion моделей для бетону та порід, підкресливши необхідність урахування швидкісної залежності міцності матеріалу та локальних умов руйнування.

Особливе місце у літературі займає модель Понселе [1] яка, незважаючи на свою давність, залишається фундаментальною завдяки чіткому поділу опору на статичну та квадратичну складові. Її математична структура лягла в основу багатьох сучасних високоінерційних моделей проникнення у ґрунти та слабкі породи, а роботи Li and Chen (2003) [10] забезпечили необхідні узагальнення у формі безрозмірних залежностей, що дозволило адаптувати класичні підходи до різних масштабів задач.

Поряд із класичними аналітичними підходами у сучасній спеціалізованій міжнародній літературі сформувався окремий напрям досліджень, пов'язаний з уточненням моделей проникнення для неоднорідних, шаруватих і високостійких матеріалів. Його розвиток спирається на безрозмірний аналіз механіки проникнення, теорію розширення порожнини, експериментальну валідацію моделей ураження цілей з бетону, а також чисельне моделювання високошвидкісної взаємодії пенетраторів із перешкодами. У цих роботах показано, що застосування класичних однорідних моделей до реальних захисних конструкцій потребує додаткового калібрування ефективних параметрів опору, динамічної міцності, густини, форми головної частини, швидкісної чутливості матеріалу та масштабних ефектів. Особливо важливим є те, що для багатошарових перешкод глибина проникнення вже не може розглядатися лише як функція початкової швидкості та середньої міцності цілі, оскільки істотну роль відіграють послідовність шарів, міжшарова взаємодія, локалізація руйнування, відкол, фрагментація та перерозподіл енергії між окремими елементами захисної системи.

Для задач оцінювання захисних споруд це означає, що аналітичні моделі проникнення доцільно використовувати не як універсальний самодостатній інструмент, а як перший рівень інженерної оцінки, який має доповнюватися параметричною калібруванням, чисельною верифікацією та сценарним аналізом. У такій постановці моделі Понселе, Форрестала, теорія розширення порожнини та енерго-балансові формулювання утворюють взаємодоповнювальну методичну основу: перші дають компактний силовий або енергетичний опис процесу, тоді як чисельні методи та контрольні сценарії дозволяють перевіряти межі застосовності цих моделей для конкретних матеріалів, геометрій і багатошарових захисних пакетів. Саме така комбінована логіка є найбільш придатною для прикладних задач оборонної інженерії, де необхідно не лише оцінити глибину занурення пенетратора, а й визначити межі працездатності конкретної архітектури захисної споруди. Таким чином, узагальнення відомих літературних джерел свідчить про те, що сучасна теорія проникнення побудована на поєднанні трьох основних підходів: інерційно-опірних моделей типу Понселе, динамічно-міцнісних моделей типу Форрестал та енерго-балансових формулювань, які забезпечують найвищу універсальність та здатність до опису багатошарових і неоднорідних цілей. Разом ці напрямки формують цілісну наукову основу для детального аналізу механіки проникнення та визначення областей ефективності кожної моделі, що є ключовим для їх практичного застосування у військово-технічних та інженерних задачах.

У сучасних прикладних дослідженнях інженерного захисту критичної інфраструктури моделі занурення пенетраторів дедалі частіше розглядаються не лише як самостійний інструмент оцінювання глибини проникнення, а як складова ширшої процедури верифікації захисних рішень. Зокрема, у роботі Мустафіна, Ларіна, Чепкова та співавторів [15–18] запропоновано розмежувати сценарії фугасно-уламкової дії та сценарії, у

яких домінує penetрація бойової частини, оскільки ці класи впливів мають різну фізичну природу і потребують різних конструктивних рішень для захисту. У межах контрольного сценарію для бойової частини Х-47М2, під час моделювання у застосунку Explicit Dynamics у 2D осесиметричній постановці, встановлено повну penetрацію багатошарового захисного пакета приблизно за 10 мс із залишковою швидкістю близько 190 м/с, що дозволило трактувати цей випадок як відсічний тест меж застосовності рішень II–III рівнів захисту за «Методикою оцінювання стану інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури», розробленою у Генеральному штабі ЗС України [19]. Такий підхід істотно доповнює класичні аналітичні моделі Понселе, Форрестала, теорії розширення порожнини та енерго-балансові формулювання: аналітичні моделі забезпечують оцінку глибини проникнення та кінематико-енергетичних характеристик процесу, тоді як контрольні чисельні сценарії дають змогу встановити практичну межю придатності конкретної архітектури захисної споруди. У цьому сенсі penetраційна модель має використовуватися не ізольовано, а як елемент модельно-орієнтованої процедури прийняття інженерних рішень щодо заглиблення, розосередження, локального підсилення або перенесення критичних функцій.

Окреме місце серед сучасних прикладних робіт, орієнтованих не стільки на розвиток фундаментальної теорії проникнення, скільки на інженерне використання її результатів у задачах захисту критичної інфраструктури, займає монографія М. В. Ковалю, В. В. Ковалю, А. С. Білика, В. І. Коцюруби та О. М. Кубракова [14]. На відміну від моделей Понселе, Форрестала та підходів теорії розширення порожнини, які спрямовані на аналітичний опис силового опору середовища і кінематики гальмування пенетратора, у цій роботі задача проникнення розглядається в контексті попереднього проектування заглиблених захисних споруд для об'єктів критичної інфраструктури. Автори використовують напівемпіричну інженерну схему, у якій глибина проникнення засобу ураження пов'язується з масою у момент влучання, діаметром, швидкістю, кутом зустрічі, формою бойової частини та податливістю середовища проникненню. Такий підхід методологічно ближчий до енерго-балансових і напівемпіричних моделей, оскільки не відтворює детально локальне поле напружень, розвиток тріщиноутворення, ерозію або деформацію пенетратора, але дозволяє перейти від оцінки глибини занурення до визначення конструктивних параметрів системи захисту: товщини обшивки, тюфяка, розподільчого шару та загальної захисної товщі. Практична цінність цієї роботи полягає у прив'язці розрахунків до реальних класів засобів повітряного нападу, для яких наведено оціночні параметри маси, швидкості, кута зустрічі та довжини бойової частини; водночас частина таких параметрів прийнята за аналогами, що потребує обережного використання результатів як попередніх інженерних оцінок, а не як верифікованої фізичної моделі проникнення. У цьому сенсі зазначена праця може бути розглянута як прикладна інженерна інтерпретація класичних моделей проникнення у задачах проектування захисних

споруд, тоді як для уточненого опису високошвидкісної взаємодії пенетратора з бетоном, залізобетоном або багатошаровими перешкодами доцільним залишається поєднання моделей Форрестала, Понселе, теорії розширення порожнини та енерго-балансового підходу.

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕНЕТРАЦІЇ

Аналітичний опис руху високошвидкісного пенетратора в суцільному середовищі ґрунтується на встановленні співвідношення між кінетичною енергією снаряда, роботою сил опору та параметрами руйнування матеріалу. Незважаючи на істотні відмінності у математичному формулюванні, усі класичні моделі проникнення можна розглядати як різні реалізації узагальненої енергетичної концепції, у межах якої зміна швидкості або глибини занурення визначається балансом між рухомою масою, опором середовища та енергією, що витрачається на руйнування. У цьому розділі наведено строгий виклад трьох фундаментальних моделей – енерго-балансової, Понселе та Форрестал – які становлять теоретичну основу сучасних підходів до оцінювання проникнення.

У найзагальнішому вигляді енерго-балансове формулювання виходить із того, що зміна кінетичної енергії пенетратора на малому відрізку шляху дорівнює роботі сил опору. Якщо позначити масу пенетратора через m , його швидкість – через $V(z)$, а опір середовища – через $R(z)$, то базове рівняння набуває вигляду

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{2} m V^2 \right) = -R(z). \quad (1)$$

Для однорідної цілі опір можна подати у формі $R(z) = \sigma_{eff} A$, де σ_{eff} – ефективна міцність матеріалу; A – площа поперечного перерізу пенетратора. Інтегрування цього рівняння за початкової умови $V(0) = V_0$ дає явний вираз для глибини проникнення:

$$L_{GEB} = \frac{m V_0^2}{2 \sigma_{eff} A}. \quad (2)$$

Попри свою простоту, ця формула є фундаментально важливою, оскільки визначає верхню межу проникнення: вона передбачає, що весь опір зумовлений виключно будівельною міцністю матеріалу, а інерційні втрати відсутні. У задачах проникнення в багатошарові масиви, де σ_{eff} змінюється зі зміною глибини, ця модель дозволяє інтегрувати локальні властивості матеріалу, даючи змогу аналізувати проникнення у середовищах зі складною структурою.

На відміну від енерго-балансової моделі, класичне рівняння Понселе включає дві складові опору – статичну (що відповідає міцності матеріалу) та квадратичну інерційну (що описує гідродинамічний або псевдогідродинамічний опір). У диференціальній формі воно подається як

$$mV \frac{dV}{dz} = -k_1 - k_2 V^2, \quad (3)$$

де k_1 відповідає статичному опору, а $k_2 V^2$ описує інерційний опір. Інтегрування дає розв'язок у вигляді логарифмічної залежності

$$L_{Poncellet} = \frac{m}{2k_2} \ln \left(1 + \frac{k_2}{k_1} V_0^2 \right). \quad (4)$$

При цьому введено поняття «інерційний опір» являє собою складову сили опору, яка виникає внаслідок необхідності прискорювати масу матеріалу цілі (ґрунту, бетону, породи) перед пенетратором, який рухається. Коли пенетратор рухається зі швидкістю V у середовищі з густиною ρ , перед його головною частиною формується зона примусового прискорення матеріалу, об'єм матеріалу, пропорційний $AVdt$, за одиницю часу отримує швидкість порядку V , надання цьому об'єму імпульсу потребує сили.

Модель Понселе добре відображає кінематичну поведінку пенетраторів у середовищах із низькою міцністю, де інерційний опір є домінуючим механізмом уповільнення. Водночас у матеріалах із високою міцністю її застосування призводить до недооцінки глибини проникнення, оскільки статичний параметр k_1 не описує складних механізмів руйнування.

Модель Форрестала має іншу фізичну природу і базується на теорії розширення порожнини, що описує локальне напружено-деформоване поле перед головною частиною снаряда. У цій моделі опір визначається не сумою статичної та інерційної складових, а синтезом динамічної міцності матеріалу σ_c та інерційних ефектів, пропорційних густині матеріалу ρ і квадрату швидкості. У простішій формі сила опору записується як

$$R = A(\sigma_c + \rho V^2), \quad (5)$$

а диференціальне рівняння руху набуває вигляду

$$mV \frac{dV}{dz} = -A(\sigma_c + \rho V^2). \quad (6)$$

Інтегрування дає

$$L_{Forrestal} = \frac{m}{2A\rho} \ln \left(1 + \frac{\rho V_0^2}{\sigma_c} \right). \quad (7)$$

Це формулювання фізично обґрунтовано описує проникнення у бетон і міцні породи, оскільки воно враховує динамічне підвищення міцності матеріалу, характерне для умов високих швидкостей деформації.

Усі розглянуті моделі можуть бути інтерпретовані як окремі випадки загальнішої концепції балансу сил і енергії, але відрізняються тим, які саме механізми опору вважаються визначальними. У моделі Понселе домінує інерційний опір, у моделі Форрестал – поєднання динамічної міцності та інерційних ефектів, тоді як енерго-балансна модель відображає ідеалізований режим, у якому опір цілі визначається лише її середньою міцністю. Саме ці відмінності зумовлюють різний характер залежностей $L(V_0)$, $V(z)$ та $E(z)$, а також відмінності областей придатності кожної моделі.

Таким чином, проведений математичний аналіз трьох фундаментальних підходів до моделювання процесу пенетрації описує не лише їх внутрішню структуру, а й підкреслює їхню компліментарність. Разом ці підходи охоплюють широкий спектр фізичних умов від м'яких ґрунтів до високотійких конструкцій, що створюють основу для подальшого порівняльного аналізу моделей

та вибору оптимального підходу для конкретних інженерних задач.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОБЛАСТЕЙ ПРИДАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ

Порівняння аналітичних моделей проникнення є ключовим етапом для встановлення закономірностей їхньої поведінки у різних фізичних умовах та для визначення меж їх коректного використання в інженерній практиці. Оскільки моделі Понселе, Форрестал та енерго-балансне формулювання ґрунтуються на різних припущеннях щодо природи опору матеріалу, вони демонструють суттєві відмінності як у прогнозах глибини проникнення, так і у характеристиках уповільнення та дисипації енергії. Порівняння здійснювалось шляхом обчислювання процесу пенетрації для двох засобів ураження проникаючої дії: Pen_406 (бойова частина аеробалістичної ракети Х-47) і BetAB-500 (бетонобійна бомба БетАБ-500), в якості цілі використовувався бетон марки М500.

Області коректного застосування аналітичних моделей наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, першою і найбільш очевидною відмінністю є характер залежності глибини проникнення від початкової швидкості. Модель Понселе, у якій опір значною мірою визначається квадратичним інерційним членом, виявляє швидке насичення глибини проникнення з ростом швидкості, що є наслідком домінування *опір*-компоненти. Це призводить до того, що вже в середньому діапазоні швидкостей подальше збільшення V_0 дає лише незначний приріст глибини. На відміну від цього, енерго-балансове формулювання передбачає значно більшу чутливість до початкової швидкості, оскільки опір у ньому подано як сталу величину, пропорційну ефективній міцності матеріалу. Тому ця модель завжди демонструє найбільші значення глибини проникнення, що відповідає її ролі як верхньої межі. Проміжну поведінку демонструє модель Форрестала, у якій динамічна міцність і інерційні ефекти збалансовані таким чином, що залежність $L(V_0)$ набуває логарифмічного характеру,

близького до поведінки реальних пенетраторів у бетонах та породах.

Другим важливим аспектом порівняння є аналіз фазової діаграми у просторі «початкова швидкість – ефективна міцність». Ця діаграма виявляє природну сегментацію областей, у яких кожна модель забезпечує найвищу точність. У зонах низької міцності цілі та помірних швидкостей модель Понселе найбільш адекватно відображає реальну кінематику уповільнення, оскільки опір матеріалу обумовлюється здебільшого інерційними силами. У середовищах високої міцності, особливо при зростанні швидкості, модель Форрестала проявляє суттєво вищу відповідність, оскільки враховує як динамічну міцність матеріалу, так і ефекти швидкісного ущільнення. Енерго-балансний підхід займає проміжну зону та стає незамінним у випадках, коли матеріал перешкоди змінює свої властивості зі збільшенням глибини проникнення, що є характерним для багатошарових геологічних профілів.

Порівняння прогнозів глибини проникнення для різних моделей наведено на рис. 2.

З аналізу залежностей, наведених на рис. 2, випливає, що при зростанні початкової швидкості проникнення відбувається перехід до режиму домінування інерційного опору середовища. У цьому режимі класична модель Понселе демонструє систематичне заниження глибини проникнення порівняно з моделлю Форрестала, що обмежує її застосування для високошвидкісних режимів. Водночас калібрована енерго-балансна модель відтворює узгоджену з моделлю Форрестала тенденцію та може розглядатися як ефективна інженерна апроксимація для практичних розрахунків.

Порівняння кінематичних характеристик моделювання – зокрема кривих швидкісного уповільнення $V(z)$ – демонструє ще більш суттєві відмінності у поведінці моделей, а енерго-балансна модель характеризується найповільнішим зниженням швидкості та рівномірною траєкторією уповільнення, що є прямим наслідком відсутності врахування інерційного опору. Модель Пон-

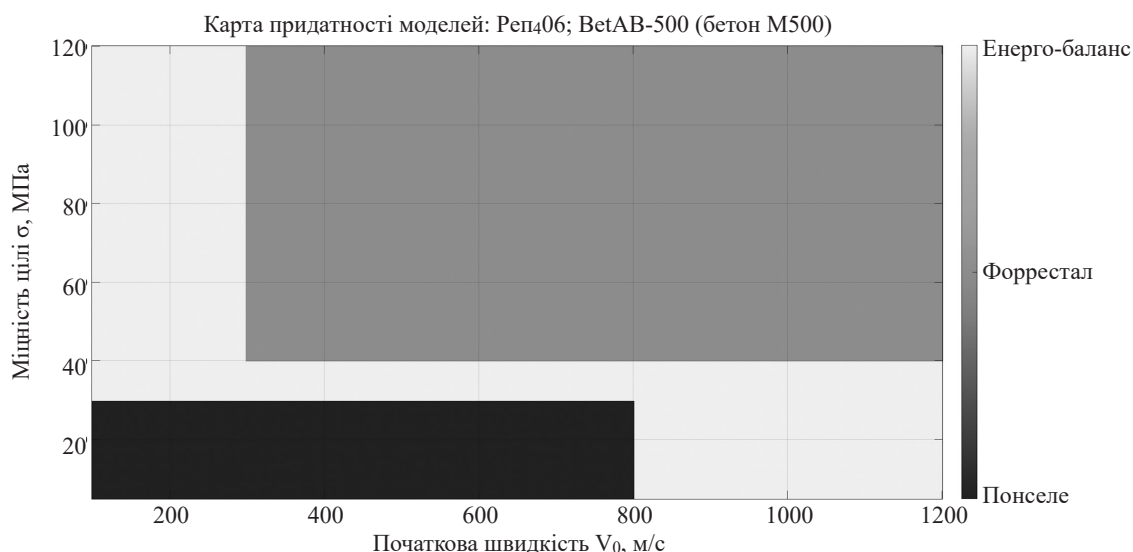


Рис. 1. Карта областей застосування аналітичних моделей проникнення залежно від початкової швидкості та міцності цілі (бетон М500)

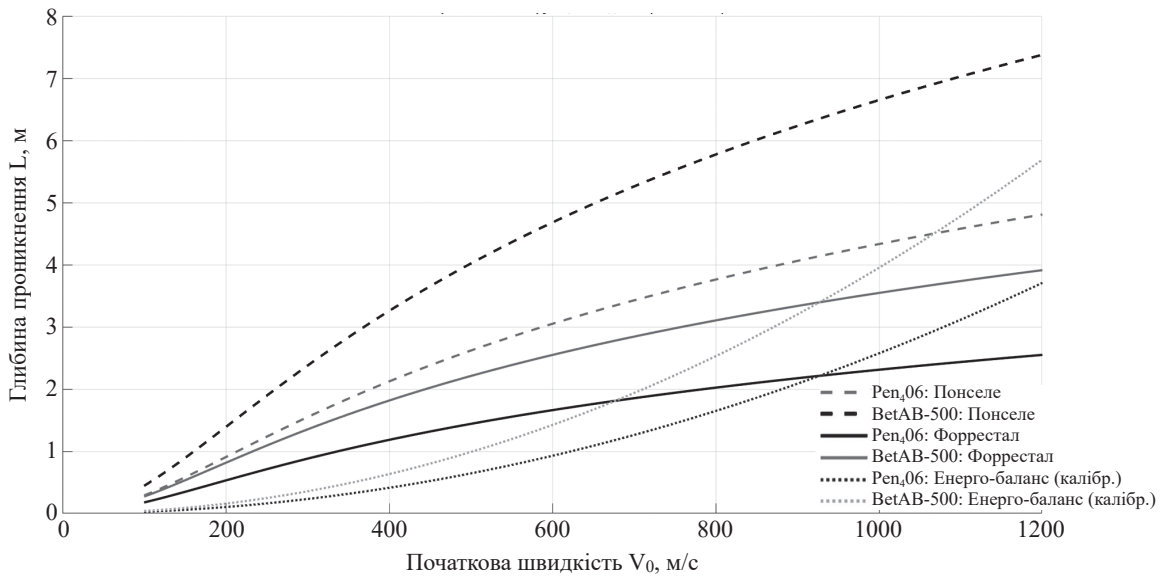


Рис. 2. Залежність глибини проникнення від початкової швидкості для різних аналітичних моделей (ціль: бетон М500; пенетратори Pen₄₀₆ (а) та BetAB-500 (б))

селе, навпаки, передбачає різке зниження швидкості вже на перших метрах проникнення, що відображає домінування квадратичного опору. Модель Форрестала демонструє найбільш реалістичний характер уповільнення у матеріалах із високою міцністю: початкове різке гальмування поступово змінюється плавним зменшенням швидкості, що узгоджується з даними експериментів. Для кількісної оцінки розбіжностей між моделями використано відносну різницю, яка наведена на рис. 3, а характер гальмування пенетратора вздовж глибини показано на рис. 4.

Слід відзначити, що відносна різниця прогнозів глибини проникнення між аналітичними моделями для пенетраторів Pen₄₀₆ та BetAB-500 збігається. Це зумовлено тим, що у відносних показниках масштабні параметри пенетратора (маса та площа поперечного перерізу) скорочуються, а відмінності визначаються

виключно формою математичних моделей та характеристиками цілі.

Аналіз енергетичних залежностей $E(z)$ підтверджує зроблені висновки щодо кінематики. У моделі Понселе енергія пенетратора дисипує найшвидше, що відповідає високому інерційному опору. У моделі Форрестал енергія спадає більш помірно, відображаючи поєднання міцнісних та інерційних механізмів. Енерго-балансовий підхід демонструє найповільніше зниження енергії, що створює умови для завищення прогнозних значень глибини проникнення. Дисипація кінетичної енергії вздовж глибини проникнення наведена на рис. 5.

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що моделі Понселе, Форрестал та енерго-балансне формулювання не є альтернативними підходами в межах однієї фізичної концепції, а радше доповнюють одна одну, охоплюючи різні режими та матеріальні умови. Кожна модель має

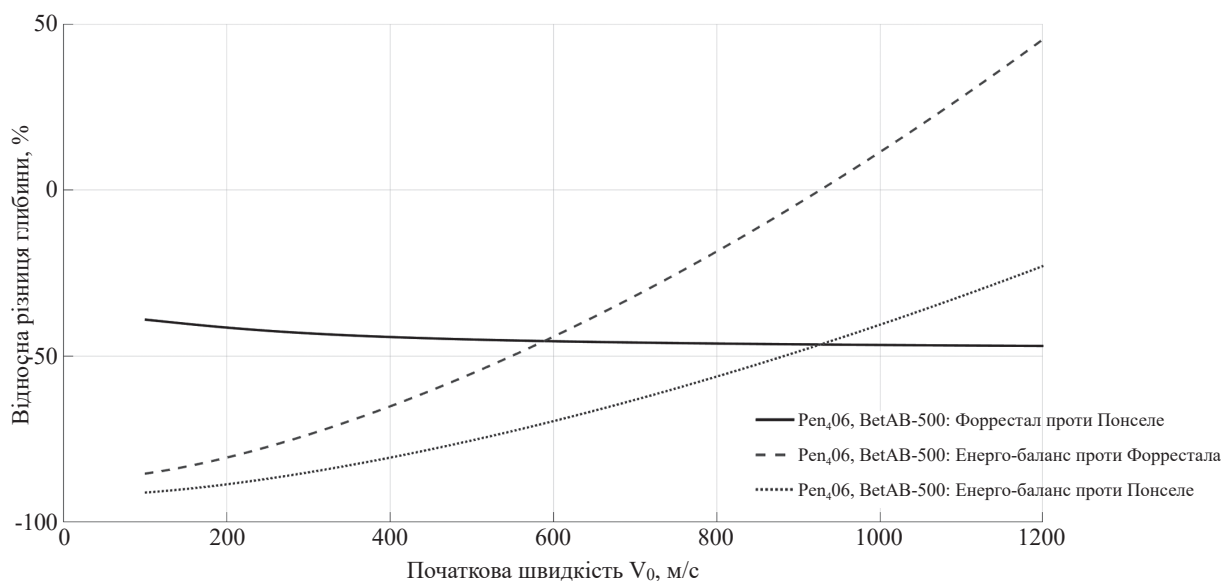
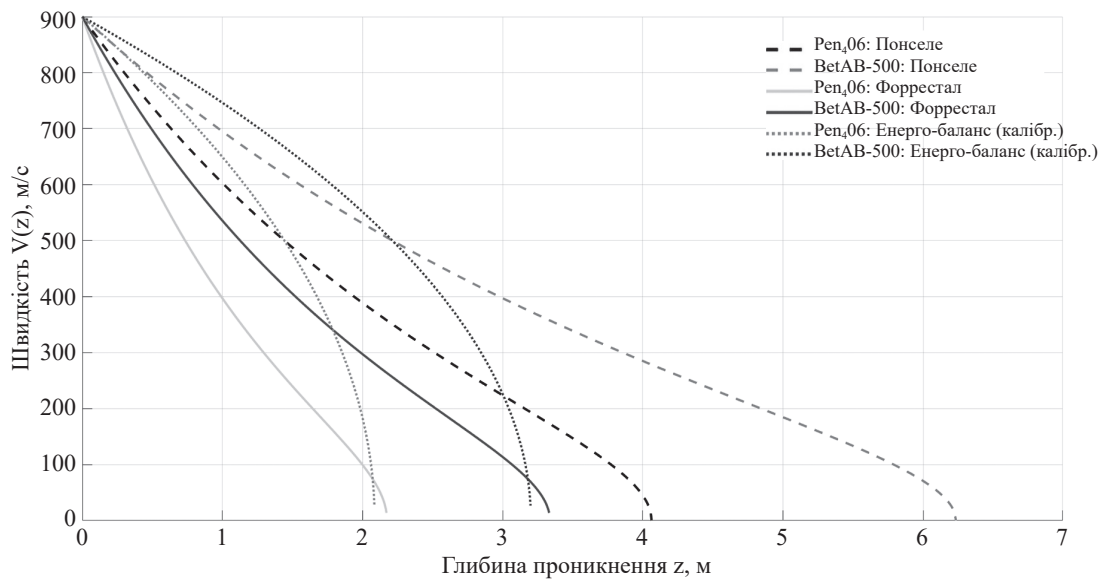
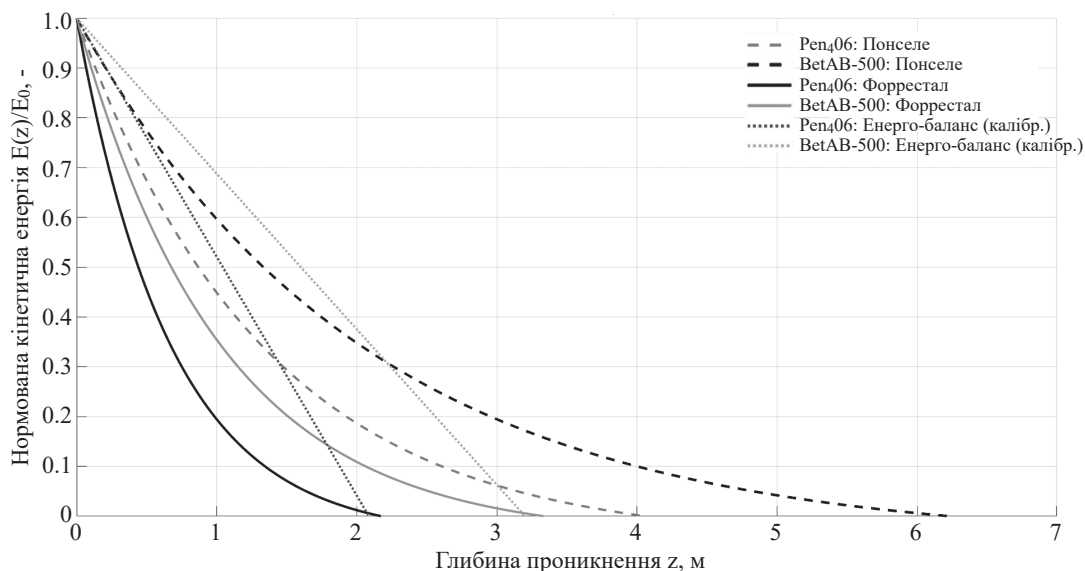


Рис. 3. Відносна різниця прогнозів глибини проникнення між аналітичними моделями залежно від початкової швидкості (ціль: бетон М500; пенетратори Pen₄₀₆ (а) та BetAB-500 (б))



Р и с . 4. Зменшення швидкості вздовж глибини $V(z)$ (ціль: бетон М500; пенетратори Pen_406 (а) та BetAB-500 (б))



Р и с . 5. Нормована кінетична енергія пенетратора як функція глибини проникнення для різних моделей (ціль: бетон М500; пенетратори Pen_406 (а) та BetAB-500 (б))

специфічну область застосування, обумовлену фізикою опору, а їх комплексне використання дозволяє створити найбільш достовірну картину поведінки пенетраторів у різних середовищах. Таке інтегроване бачення є необхідним для коректного вибору інженерних методів розрахунку, для подальшої чисельної верифікації та для практичних застосувань в оборонній інженерії та геомеханіці.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ МОДЕЛІ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Рациональний вибір моделі проникнення визначається передусім фізичними властивостями цілі, характером її структурної будови, а також діапазоном швидкостей, у якому працює пенетратор. Проведений аналіз засвідчив, що кожна з розглянутих моделей ґрунтується на різних припущеннях щодо природи опору матеріалу, тому застосування певної моделі є виправданим лише за наявності конкретних умов, які відповідають її фізичним обмеженням.

У середовищах із низькою міцністю, зокрема у ґрунтах, пісках, лесовидних відкладах та слабких породах, визначальну роль відіграє інерційний опір, який пропорційний квадрату швидкості. У таких умовах модель Понселе забезпечує найбільш узгоджений опис як кінематики, так і енергетики руху пенетратора, оскільки її математична структура природно відтворює різке уповільнення на початкових етапах занурення у слабо зв'язні матеріали. Водночас застосування цієї моделі до високої міцності матеріалів веде до значних відхилень, що зумовлено спрощеним описом статичної складової опору та відсутністю механізму врахування динамічної міцності.

У випадках взаємодії з бетонними, залізобетонними та кам'яними перешкодами домінує інша фізика процесу, пов'язана з розвитком зон локального руйнування та високошвидкісного напруженого стану. Модель Форрестала, що враховує динамічну міцність матеріалу та

інерційні ефекти у зоні розширення порожнини перед головною частиною пенетратора, показує високу адекватність у широкому діапазоні швидкостей, особливо коли початкова швидкість перевищує 300–400 м/с. Її використання забезпечує фізично обґрунтовані оцінки глибини проникнення у міцні матеріали, де класичні інерційно-опірні моделі або енерго-балансові підходи демонструють систематичні похибки. Втім, модель Форрестала потребує наявності достовірних значень динамічної міцності бетону чи породи, і саме точність цих параметрів визначає її практичну ефективність.

У випадках, коли ціль має складну багат шарову будову, в якій механічні властивості суттєво змінюються із глибиною, найдоцільніше застосовувати енерго-балансову модель. Її математична структура дозволяє безпосередньо враховувати зміну ефективної міцності з глибиною, що робить її особливо корисною для моделювання інженерно обладнаних районів, багат шарових ґрунтово-літологічних профілів, а також конструкцій зі змінною або невизначеною структурою. На відміну від моделей Понселе і Форрестал, які оперують переважно однорідними середовищами, енерго-балансовий підхід дозволяє отримати як узагальнену, так і локально диференційовану картину енергетичної взаємодії з кожним шаром. Водночас він забезпечує верхню межу можливого проникнення, що має особливу важливість у задачах проектування захисту.

Аналіз кінематичних $V(z)$ та енергетичних $E(z)$ кривих, отриманих для кожної моделі, продемонстрував, що реалістичність поведінки залежить не лише від матеріалу цілі, а й від того, наскільки модель відтворює динаміку розсіювання енергії. Тоді як модель Понселе передбачає найшвидшу втрату енергії під дією квадратичного опору, а модель Форрестала описує збалансоване поєднання інерційних та міцнісних ефектів, енерго-балансна модель показує мінімальне зниження енергії, що і пояснює її характерне завищення глибини проникнення. Таким чином, порівняння форм енергетичних кривих створює можливість для обґрунтованого вибору моделі залежно від того, чи необхідно отримати консервативну оцінку, максимально реалістичний прогноз або верхню межу проникнення.

У практиці інженерних розрахунків найбільш ефективним є комбінований підхід. Енерго-балансові формули доцільно застосовувати для попередньої оцінки та визначення максимально можливої глибини проникнення, після чого моделі Форрестал або Понселе слід використовувати для уточнення прогнозів відповідно до типу матеріалу та швидкісного режиму. Такий підхід дозволяє уникнути переоцінки або недооцінки здатності пенетраторів проходити через конкретні шари або інженерні споруди й забезпечує збалансоване поєднання безпеки та точності у розрахунках.

Узагальнюючи, вибір моделі проникнення має ґрунтуватися на поєднанні фізичних характеристик матеріалу, швидкісних параметрів удару та структурної складності цілі. На теперішній час, за таких вимог, універсальної моделі не існує. Лише комплексний, диференційований підхід із урахуванням наведених положень забезпечує адекватність результатів та їх практичну придатність

у прикладних задачах військово-технічного аналізу та інженерного проектування.

Для розроблення алгоритму вирішення прикладних задач оцінки захисту об'єктів критичної інфраструктури доцільно продовжити дослідження у напрямі аналітичного оцінювання за контрольними чисельними сценаріями, які дозволяють встановити не лише прогнозну глибину проникнення, а й межу придатності конкретної архітектури захисної споруди.

ВИСНОВКИ

Проведений у роботі аналіз дозволив у першому наближенні сформулювати цілісну наукову картину механіки проникнення високошвидкісних пенетраторів у середовища різної природи, що охоплює слабкозв'язні ґрунти, структури середньої міцності та високоміцні бетонні та гірські породи. Розглянуті моделі Понселе, Форрестала та енерго-баланса, продемонстрували їх суттєві відмінності як у механічних припущеннях, так і в прогнозованих кінематичних та енергетичних характеристиках, що свідчить про неможливість універсального застосування будь-якої з них у всьому діапазоні властивостей цілі та швидкісних режимів проникнення.

Модель Понселе, яка описує опір як суму статичного та квадратичного інерційного складників, показала високу відповідність при моделюванні проникнення в слабкі та середньозв'язні середовища, де інерційний опір визначає основний механізм гальмування руху. Її математична структура точно передає характер швидкісного уповільнення за таких умов, проте не здатна забезпечити достатню точність при моделюванні проникнення у матеріалах із високою міцністю, що обмежує її застосовність у задачах, пов'язаних із бетонними та кам'яними перешкодами.

Модель Форрестала, побудована на теорії розширення порожнини та динамічній міцності матеріалу, продемонструвала найбільш адекватні результати для цілей високої міцності. Вона відтворює фізику локального руйнування у зоні перед головною частиною пенетратора і забезпечує реалістичні залежності глибини проникнення від початкової швидкості. Таким чином, ця модель є найбільш достовірною у випадках, коли матеріал характеризується високою щільністю, значною динамічною міцністю та інтенсивними процесами ударного ущільнення.

Енерго-балансне формулювання, яке ґрунтується на рівності зміни кінетичної енергії і роботи сил опору, виявилось найбільш універсальним у сенсі здатності описувати проникнення у багат шарові та неоднорідні масиви. Його інтегральна структура дозволяє безпосередньо враховувати змінність ефективної міцності з глибиною, що робить цей підхід природним інструментом для аналізу складних геолого-літологічних профілів та інженерних споруд зі змінними властивостями. Разом з тим саме ця модель надає верхню межу глибини проникнення, оскільки не відображає інерційних механізмів опору, характерних для реальних матеріалів.

Інтегрована перевірка моделей на базі побудованих фазових діаграм, кінематичних залежностей $V(z)$ та енергетичних кривих $E(z)$ показала, що кожна з моде-

лей має чітко окреслену область придатності. Модель Понселе є найбільш ефективною для середовищ малої міцності, Модель Форрестала – для конструкцій та геоматеріалів високої міцності, а енерго-балансове формулювання – для багатопарових та неоднорідних цілей, де властивості середовища істотно змінюються з глибиною. Водночас жодна модель не вичерпує усі можливі сценарії, що зумовлює необхідність диференційованого підходу до вибору застосованої моделі проникнення.

Окремо встановлено, що відносна різниця прогнозів глибини проникнення між аналітичними моделями є інваріантною щодо маси та геометричних характеристик пенетратора за умови однорідності матеріалу цілі. Така інваріантність зумовлена скороченням масштабних параметрів пенетратора у відносних показниках і свідчить про те, що характер розбіжностей між моделями визначається виключно їхньою математичною формою та параметрами цілі.

У цілому, отримані результати свідчать, що найбільш надійна методологія аналізу проникнення полягає у використанні комбінованого підходу, який передбачає застосування енерго-балансової моделі для оцінювання верхньої межі проникності та подальше уточнення результатів за допомогою моделей Понселе або Форрестала залежно від фізичних характеристик матеріалу. Такий підхід дозволяє уникнути систематичних помилок, притаманних кожній окремій моделі, та забезпечує збалансоване поєднання точності, надійності та фізичної інтерпретованості результатів.

Окрім того, результати порівняльного аналізу створюють основу для подальшої інтеграції аналітичних моделей у чисельні методи моделювання, зокрема в системах високолінійного скінченно-елементного аналізу LS-DYNA та Autodyn, що відкриває можливість для більш глибокого дослідження складних сценаріїв, включно з анізотропними та сильно неоднорідними середовищами. Загалом проведена робота формує узагальнену платформу для розвитку інженерних методів прогнозування глибини проникнення та для створення практичних рекомендацій у військово-технічній сфері, геомеханіки та проектуванні захисних споруд.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Poncelet, J. (1839). *Traité de mécanique*. Paris: Bachelier.
- Forrestal, M. J. & Luk, V. K. (1997). Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastoplastic solid. *Intern. J. of Solids and Structures*. Vol. 34(24). Pp. 3127—3141. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90096-0.
- Forrestal, M. J., Tzou, D. Y. & Luk, V. K. (1991). Penetration into concrete targets with ogive-nose projectiles. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 11(3). Pp. 395—406. DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00017-6.
- Anderson, C. E. (2017). Analytic models for penetration mechanics: a review. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 108. Pp. 3—26. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.018.
- Young, C. W. (1977). *Penetration equations*. Sandia Nat. Laboratories Report. SAND77-0429. Albuquerque.
- Recht, R. F. & Ipson, T. W. (1963). Ballistic perforation dynamics. *J. of Applied Mechanics*. Vol. 30. Pp. 384—390. DOI: 10.1115/1.3636566.
- Wen, H. M. & Chen, W. W. (2002). Penetration resistance of concrete: cavity expansion approach. *Intern. J. of Solids and Structures*. Vol. 39(13). Pp. 3741—3752. DOI: 10.1081/SME-120015076.
- Jin, X., Li, Y. C. & Chen, W. W. (2017). Prediction of penetration depths using cavity expansion theory. *PLOS ONE*. 2017. Vol. 12(4). e0175785. DOI: 10.1371/journal.pone.0175785.
- Chen, X., Huang, F. & Xia, Y. (2004). Rock penetration modeling using cavity expansion theory. *Intern. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 41(3). Pp. 447—458. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2003.12.007.
- Li, Q. M. & Chen, X. (2003). Dimensionless analysis of penetration. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 28(1). Pp. 93—116. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00037-4.
- Frew, D. J., Forrestal, M. J. & Hickerson, J. P. (2006). Penetration of concrete targets. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 33(1–12). Pp. 973—985. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.006.
- Sarva, S. & Nemat-Nasser, S. (2001). Dynamic response of materials to penetration. *Mech. Mater.* Vol. 33(9). Pp. 579—596. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01172-8.
- Александров С. Б., Костарева Н. Б., Моргунов М. Н. Устойчивость движения проникающих боеприпасов. *Боеприпасы*. 1987. № 6. С. 44—47.
- Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника : монографія / М. В. Коваль, В. В. Коваль, А. С. Білик, В. І. Коцюрuba, О. М. Кубраков ; за ред. А. С. Білика. Київ : Генеральний штаб Збройних Сил України. 2023. 185 с.
- Муштафін М. А., Ларін О. Ю., Чепков І. Б. Огляд та критичний аналіз методів оцінювання занурення пенетраторів у перешкоди (цілі). *Матер. XI міжнар. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану»*. Київ : ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2025. С. 305—310.
- Оцінювання інженерного захисту критичних об'єктів: фугасна дія типових бойових частин та пенетрація БЧ класу Х-47М2 / Муштафін М. А., Ларін О. Ю., Чепков І. Б., Гришак Д. В., Адаменко Б. І. *Матер. XI міжнар. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану»*. Київ : ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2025. С. 642—649.
- Модельно-орієнтована параметризація та КРІ-верифікація інженерного захисту критичних вузлів гідроенергетичної інфраструктури (ГЕС/ГАЕС) в умовах повітряних атак / Ларін О. Ю., Чепков І. Б., Крайнік В. Я., Сук С. П. *Матер. XI міжнар. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану»*. Київ : ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2025. С. 619—625.
- Модельно-орієнтована програма верифікації інженерного захисту критичних вузлів об'єктів гідроенергетики (структура доказовості, документування та масштабування) при застосуванні засобів повітряного нападу / Ларін О. Ю., Сухецький Б. Л., Кучер В. Г., Медьєши В. І., Яременко С. О., Гринь В. А. *Матер.*

XI міжнар. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрями озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану». Київ : ЦНДІ ОБТ ЗСУ, 2025. С. 612—619.

19. Методика оцінювання стану інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури : затв. заст. начальника Генерального штабу Збройних Сил України 27.11.2023. Київ. 2023. 31 с.

REFERENCES

- Poncelet, J. (1839). *Traité de mécanique*. Paris: Bachelier.
- Forrestal, M. J. & Luk, V. K. (1997). Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastoplastic solid. *Intern. J. of Solids and Structures*. Vol. 34(24). Pp. 3127—3141. DOI: 10.1016/0734-743X(87)90096-0.
- Forrestal, M. J., Tzou, D. Y. & Luk, V. K. (1991). Penetration into concrete targets with ogive-nose projectiles. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 11(3). Pp. 395—406. DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00017-6.
- Anderson, C. E. (2017). Analytic models for penetration mechanics: a review. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 108. Pp. 3—26. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.018.
- Young, C. W. (1977). Penetration equations. Sandia Nat. Laboratories Report. SAND77-0429. Albuquerque.
- Recht, R. F. & Ipson, T. W. (1963). Ballistic perforation dynamics. *J. of Applied Mechanics*. Vol. 30. Pp. 384—390. DOI: 10.1115/1.3636566.
- Wen, H. M. & Chen, W. W. (2002). Penetration resistance of concrete: cavity expansion approach. *Intern. J. of Solids and Structures*. Vol. 39(13). Pp. 3741—3752. DOI: 10.1081/SME-120015076.
- Jin, X., Li, Y. C. & Chen, W. W. (2017). Prediction of penetration depths using cavity expansion theory. *PLOS ONE*. 2017. Vol. 12(4). e0175785. DOI: 10.1371/journal.pone.0175785.
- Chen, X., Huang, F. & Xia, Y. (2004). Rock penetration modeling using cavity expansion theory. *Intern. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 41(3). Pp. 447—458. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2003.12.007.
- Li, Q. M. & Chen, X. (2003). Dimensionless analysis of penetration. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 28(1). Pp. 93—116. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00037-4.
- Frew, D. J., Forrestal, M. J. & Hickerson, J. P. (2006). Penetration of concrete targets. *Intern. J. of Impact Engineering*. Vol. 33(1–12). Pp. 973—985. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.006.
- Sarva, S. & Nemat-Nasser, S. (2001). Dynamic response of materials to penetration. *Mech. Mater.* Vol. 33(9). Pp. 579—596. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01172-8.
- Aleksandrov, S. B., Kostareva, N. B., & Morgunov, M. N. (1987). “Ustoychivost dvizheniia pronikayushchikh boepripasov [Motion stability of penetrating ammunitions]. *Boepripasy*, (6), Pp. 44—47 [in Russian].
- Koval, M. V., Koval, V. V., Bilyk, A. S., Kotsiuruba, V. I., & Kubrakov, O. M. (2023). “Osnovy inzhenerenoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitrianoho napadu protyvnyka” [Fundamentals of engineering protection of critical infrastructure objects of the energy sector of Ukraine from enemy air attack weapons]: Monograph (A. S. Bilyk, Ed.). General Staff of the Armed Forces of Ukraine [in Ukrainian].
- Mustafin, M. A., Larin, O. Yu., & Chepkov, I. B. (2025). “Ohliad ta krytychnyi analiz metodiv otsiniuvannya zanurennia penetratoriv u pereshkody (tsili)” [Review and critical analysis of methods for evaluating the penetration of penetrators into obstacles (targets)]. *Proc. of the XI Intern. Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Military-Technical Policy and Directions of Armament of the Armed Forces of Ukraine under Martial Law»*. Pp. 305—310. Central Scient. Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine [in Ukrainian].
- Mustafin, M. A., Larin, O. Yu., Chepkov, I. B., Hryshchak, D. V., & Adamenko, B. I. (2025). “Otsiniuvannya inzhenerenoho zakhystu krytychnykh ob'ektiv: fuhasna diia tipovykh boiovykh chastyn ta penetratsiia BCh klasu Kh-47M2” [Evaluation of engineering protection of critical objects: High-explosive effect of typical warheads and penetration of Kh-47M2 class warheads]. *Proc. of the XI Intern. Scient. and Technical Conf. «Actual Problems of Military-Technical Policy and Directions of Armament of the Armed Forces of Ukraine under Martial Law»* Pp. 642—649. Central Scient. Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine [in Ukrainian].
- Larin, O. Yu., Chepkov, I. B., Krainik, V. Ya., & Suk, S. P. (2025). “Modelno-orientovana parametryzatsiia ta KPI-veryfikatsiia inzhenerenoho zakhystu krytychnykh vuzliv hidroenerhetychnoi infrastruktury (HES/HAES) v umovakh povitrianykh atak” [Model-oriented parameterization and KPI-verification of engineering protection of critical nodes of hydropower infrastructure (HPP/PSPP) under air attacks]. *Proc. of the XI Intern. Scient. and Technical Conf. «Actual Problems of Military-Technical Policy and Directions of Armament of the Armed Forces of Ukraine under Martial Law»*. Pp. 619—625. Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine [in Ukrainian].
- Larin, O. Yu., Sukhetskyi, B. L., Kucher, V. G., Medieshi, V. I., Yaremenko, S. O., & Hryn, V. A. (2025). “Modelno-orientovana prohrama veryfikatsii inzhenerenoho zakhystu krytychnykh vuzliv ob'ektiv hidroenerhetyky (struktura dokazovosti, dokumentuvannya ta mashtabuvannya) pry zastosuvanni zasobiv povitrianoho napadu” [Model-oriented program for verification of engineering protection of critical nodes of hydropower facilities (structure of evidence, documentation and scaling) during the use of air attack weapons]. *Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Military-Technical Policy and Directions of Armament of the Armed Forces of Ukraine under Martial Law»* Pp. 612—619. Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine [in Ukrainian].
- General Staff of the Armed Forces of Ukraine. (2023). “Metodyka otsiniuvannya stanu inzhenerenoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury” [Methodology for assessing the state of engineering protection of critical

infrastructure objects] (Approved by the Deputy Chief of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine on November 27, 2023) [in Ukrainian].

**Larin O.Yu., Mustafin M.A.,
Krainik V.Ya., Suk S.P.**

REVIEW AND CRITICAL ANALYSIS OF METHODS FOR EVALUATING PENETRATOR PENETRATION INTO BARRIERS (TARGETS)

The paper presents a systematic review and critical analysis of methods for evaluating the penetration depth of high-velocity penetrators into barriers and targets of different mechanical nature. Three principal classes of models are considered: the inertial-resistance Poncelet model, the dynamic-strength Forrestal model associated with the cavity expansion concept, and the energy-balance approach used as an integral framework for heterogeneous and layered targets. The physical assumptions, mathematical structure, applicability domains and limitations of each approach are analyzed. It is shown that these models should not be treated as fully interchangeable; rather, they complement one another depending on target strength, impact velocity, penetrator geometry and structural complexity of the barrier. Special attention is given to applied and verification-oriented studies in which analytical penetration estimates are used to substantiate protective structures for critical infrastructure. Recommendations are formulated for the combined use of analytical models and control numerical scenarios in defence engineering and protective-structure design.

Keywords: penetrator, penetration, penetration depth, Poncelet model, Forrestal model, cavity expansion theory, energy-balance approach, protective structures, reinforced concrete, engineering protection.

Відомості про авторів:

Ларін Олександр Юрійович

кандидат технічних наук
начальник науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6933-850X>
e-mail: sanlarin@meta.ua

Мустафін Марат Анатолійович

начальник відділу розвитку засобів виявлення та ситуаційної обізнаності Управління інноваційної діяльності та розвитку Командування сил безпосереднього протиповітряного прикриття Командування Повітряних Сил Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9340-6223>
e-mail: mustafinmrt@gmail.com

Крайнік Вадим Ярославович

голова правління ПрАТ «Укргідропроєкт»
м. Харків, Україна
e-mail: sv.usbu.kh@ukr.net

Сук Сергій Павлович

головний інженер проєкту
ПрАТ «Укргідропроєкт»
м. Харків, Україна
e-mail: sv.usbu.kh@ukr.net

Information about the authors:

Larin Oleksandr

Candidate of Technical Sciences
Head of the Research Department for the Development of Weapons and Military Equipment of the Land Forces
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6933-850X>
e-mail: sanlarin@meta.ua

Mustafin Marat

Head of the Department for the Development of Detection Systems and Situational Awareness Directorate for Innovation and Development of the Command of Direct Air Defense Cover Forces
Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9340-6223>
e-mail: mustafinmrt@gmail.com

Krainik Vadym

Chairman of the Board of PrJSC «Ukrhydroproject»
Kharkiv, Ukraine
e-mail: sv.usbu.kh@ukr.net

Suk Serhii

Chief Project Engineer of PrJSC «Ukrhydroproject»
Kharkiv, Ukraine
e-mail: sv.usbu.kh@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 12.05.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 623.451.7 + 623.465

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).27-31](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).27-31)

О. А. МАЙСТРЕНКО, кандидат технічних наук
старший дослідник
<https://orcid.org/0000-0001-9701-7359>

Е. С. ОСТАПЧУК

<https://orcid.org/0009-0002-8095-0203>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

Б. І. АДАМЕНКО

<https://orcid.org/0000-0003-3814-3624>

О. В. ТИМОШКО

(АТ «Компанія авіаційного та ракетно-технічного машинобудування»)

ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ДАЛЬНОСТІ СТРІЛЬБИ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ: ДОННИЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР, АКТИВНО-РЕАКТИВНИЙ СНАРЯД ТА ПРЯМОТОЧНИЙ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН – ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

У статті проведено комплексний порівняльний аналіз трьох технологій підвищення дальності стрільби 155-мм артилерійських боєприпасів: донного газогенератора (Base Bleed, BB), активно-реактивного снаряда (АРС) з твердим ракетним двигуном та прямомоточного повітряно-реактивного двигуна (ПВРД, Ramjet). Розглянуто фізичні механізми зниження аеродинамічного опору, хімічний склад твердого палива, конструктивні особливості та аеробалістичні властивості кожної технології. На основі формалізованої моделі ефективної вартості ураження цілі СРК (Cost Per Kill) виконано кількісне порівняння семи сучасних зразків 155-мм боєприпасів за критерієм вартість/дальність/точність. Встановлено, що гібридні системи BB+SRM забезпечують дальність 60–76 км і є оптимальними за критерієм вартість/ефект для поточного покоління ствольної артилерії. Снаряди з Ramjet-двигуном є єдиною технологією, здатною досягти 100–150 км без критичної ерозії ствола, але потребують вирішення фундаментальних науково-технічних проблем. Запропоновано семирівневу ієрархію дослідницьких задач для реалізації гібридних далекобійних систем.

Ключові слова: донний газогенератор, активно-реактивний снаряд, прямомоточний повітряно-реактивний двигун, дальність стрільби, аеродинамічний опір, модель СРК, 155-мм артилерія, тверде ракетне паливо.

ВСТУП

Повномасштабне збройне протистояння в Україні підтвердило: артилерія залишається вирішальним засобом вогневого ураження, а перевага у дальності безпосередньо визначає результат контрбатарейної боротьби та глибину вогневого впливу на оперативних тилах противника. Стандартні 155-мм снаряди типу M795 мають максимальну дальність 22–24 км (гармати L/39) та 30 км (L/52), що в умовах сучасного театру воєнних дій виявляється недостатнім для ефективного вогневого контролю.

Три технологічні підходи спрямовані на подолання цього обмеження. Донний газогенератор (Base Bleed, BB) – зріла серійна технологія, що забезпечує 30–43 км. Активно-реактивний снаряд (АРС) з твердим ракетним двигуном (SRM) – технологія активного розвитку, яка дає 30–76 км залежно від конфігурації. Прямоточний повітряно-реактивний двигун (Ramjet) – перспективна технологія наступного покоління з потенціалом 100–150 км, що перебуває на стадії льотних випробувань.

Мета статті – провести комплексний порівняльний аналіз зазначених технологій за уніфікованими кількісними критеріями ефективності та сформулювати актуальні напрями наукових досліджень для вітчизняної оборонно-промислової бази. Аналіз виконано на основі формалізованої балістично-економічної моделі СРК, а також огляду публікацій у провідних міжнародних виданнях – Aerospace Science and Technology, Defense Technology та Propellants, Explosives, Pyrotechnics (Wiley).

Проблема дефіциту дальності не є новою: ще у 1979–1988 рр. радянські дослідники Миронов, Белецький, Федосов та ін. публікували результати досліджень НДС (напружено-деформованого стану) зарядів АРС при комплексному навантаженні, динаміки зниження ударних перевантажень та моделей аномального запалювання ракетного заряду [1–3]. Ці роботи є прямими попередниками сучасних досліджень і демонструють, що фундаментальні фізичні проблеми твердопаливних систем – нестаціонарне горіння при депресуризації, механічна цілісність при пострілі – залишаються актуальними й через 45 років.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗНИЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ

Загальний аеродинамічний опір 155-мм снаряда в надзвуковому режимі польоту складається з трьох компонентів: хвильового опору носової частини (50–60 %), опору тертя поверхні (10–15 %) та донного опору (30–40 %). Особливість донного опору полягає в тому, що на числах M його частка зростає до 50–75 % від загального опору, оскільки саме в трансзвуковому режимі зона рециркуляції за дном снаряда має найбільші розміри та найнижчий тиск [4].

Донний опір виникає внаслідок відриву потоку на задній кромці та формування зони рециркуляції. Для

аеродинамічно оптимізованих снарядів типу ERFB донний опір відповідає за 75 % загального опору на числах M близько 0,9 та за 50–55 % при $M > 1,2$ [5]. Ця закономірність є фізичним обґрунтуванням ефективності ВВ саме в надзвуковому режимі.

Три технології адресують цю проблему через принципово різні механізми: ВВ усуває зону рециркуляції шляхом масового впорскування газу (підвищення донного тиску до рівня атмосферного); APC/SRM компенсує ретардаційну силу активною реактивною тягою; Ramjet підтримує надзвукову швидкість протягом усього польоту, мінімізуючи час перебування в трансзвуковому режимі з максимальним донним опором. Ці механізми взаємодоповнюються в гібридних конструкціях ВВ з SRM (V-LAP).

ТЕХНОЛОГІЯ ДОННОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА (BASE BLEED)

Технологія ВВ бере початок від досліджень Інституту оборонних досліджень Швеції (FOA) у 1969–1971 рр. та патентів на снаряд ERFB канадського інженера Джеральда Булла. Принцип дії ґрунтується на спалюванні малого заряду твердого палива у задонній камері снаряда і подаванні продуктів згоряння через калібровані сопла у зону рециркуляції. На відміну від ракетного двигуна, ВВ-генератор не створює тяги – він лише вирівнює різницю тисків між дном снаряда та атмосферою.

Ефективність ВВ визначається безрозмірним параметром впорскування

$$I = \dot{m}_j / (\rho_{inf} v_{inf} A),$$

де \dot{m}_j – масова витрата газу генератора, ρ_{inf} і v_{inf} – щільність та швидкість набігаючого потоку, A – площа дна снаряда. Дослідження, опубліковані в Aerospace Science and Technology та Defense Technology, встановили оптимальне значення $I \approx 0,005$: при ньому зниження донного опору досягає 50–75 % у надзвуковому режимі ($M = 1,5–3,0$), що забезпечує приріст дальності 25–35 %. Перевищення оптимального I є контрпродуктивним: надлишковий струмінь руйнує структуру зони рециркуляції і збільшує загальний опір [4].

Сучасне паливо ВВ-генераторів є сумішевим на основі перхлорату амонію AP (75 %), полібутадієну НТРВ (15–20 %), алюмінієвого порошку (5 %) та оксиду заліза Fe_2O_3 як каталізатора горіння (1–2 %). Критичною проблемою залишається повторне запалювання (reignition) при виході снаряда зі ствола. Дослідження Нанкінського університету науки і технологій (NUST) показали, що піротехнічні суміші Mg/PTFE з оптимізованою гранулометриєю забезпечують повторне запалювання за 94–280 мс; варіативність цього параметра є головним джерелом дисперсії СЕР і потребує вирішення для інтеграції ВВ з модулями точного наведення [5].

Провідні серійні зразки ВВ-боєприпасів: K307 HE-BB (Poongsan, Корея) – 41 км з L/52, вартість ~4 500 USD; LU 211 BB (KNDS, Франція) – 40 км; OFd M3-DV (MSM Group, Польща/Словаччина) – 43 км з L/52; DM131 з модулем PGK (Rheinmetall, Німеччина) – 40 км, СЕР < 20 м.

АКТИВНО-РЕАКТИВНИЙ СНАРЯД З ТВЕРДИМ РАКЕТНИМ ДВИГУНОМ

APC поєднує артилерійський снаряд та SRM, що вмикається через піротехнічний сповільнювач через 5–10 секунд після пострілу. Затримка необхідна для стабілізації снаряда в зоні максимальної турбулентності поблизу дульного зрізу. На відміну від ВВ, APC створює активну реактивну тягу, прямо компенсуючи аеродинамічний опір і збільшуючи дальність на 25–60 % залежно від маси палива [6].

Класичним представником є американський M549A1 HE-RAP: маса палива SRM – 3,2 кг, час роботи – ~3 секунди, дальність – 30,1 км з L/39. Ключовим конструктивним компромісом є зменшення маси ВР: у M549A1 – 6,8 кг проти 10,5 кг у M795, тобто зниження летальності на 35 %. Цей компроміс є фізичним, а не технологічним: об'єм калібру є константою.

Снаряд XM1113 (General Dynamics OTS, США) є принципово новим рівнем. Двигун забезпечує тягу, утричі більшу за M549A1, а вдосконалений аеродинамічний профіль дає 40 км з L/39 та 70 км зі стволів L/58. Споряджений нечутливою ВР IMX-104 (DNAN+NTO+RDX, швидкість детонації 7,4 км/с), яка відповідає стандартам IM НАТО. Вартість: 13 656 USD (L/39) та 14 484 USD (Extended Range для L/58) [7, 8].

Гібридна конструкція V-LAP (Rheinmetall Denel, ПАР) є найбільш ефективним поточно доступним рішенням: ВВ-генератор вмикається першим (фаза M 1,5–3,0), після його вигорання залишковий заряд функціонує як ВВ на спадній ділянці, а SRM забезпечує активний розгін на висхідній. Рекорди полігонних випробувань (Алкантпан, 2019): 54 км з L/39, 67 км з L/52 (PzH 2000), 76 км з L/52 зі збільшеною каморою. Вартість: 6 000–9 000 USD [9].

ПРЯМОТОЧНИЙ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН (RAMJET 155)

ПВРД принципово відрізняється від SRM відсутністю окислювача на борту: атмосферний кисень стискається за рахунок надзвукового руху снаряда (ефект рамстиснення, $M > 1,5$), змішується з паливом у камері згоряння і згорає, генеруючи постійну тягу протягом 40–60 секунд. Це дозволяє підтримувати швидкість снаряда близько до надзвукової протягом усього польоту та досягати дальностей 100–150 км [10].

Спільний проєкт Boeing та Nammo (Норвегія) – Ramjet 155 – є найбільш просунутою публічно відомою розробкою. Льотні випробування 2022 р. підтвердили: стабільність горіння ПВРД після перевантажень при пострілі (15 000–20 000 г) та збереження надзвукового польоту після запуску двигуна. Потенційна дальність – до 150 км. ПТ Madras (Індія, 2025) підтвердив принципову сумісність Ramjet-снаряда зі стандартною гарматою без руйнування вузлів [11].

Технологія ПВРД стикається з трьома класами фундаментальних проблем, що потребують окремих дослідницьких програм. Клас I – стабільність горіння: паливо з високим вмістом бору В, оптимальне за питомим імпульсом, утворює в'язкий оксид B_2O_3 , що осідає в камері згоряння і може блокувати повітрязабірник; ця проблема не має опублікованого рішення. Клас II –

геометричні обмеження: розміщення камери згоряння, повітрязабірника та паливного зерна у калібрі 155 мм при збереженні прийнятної маси БЧ є конструктивно надскладним завданням; відкриті дані про масу БЧ відсутні. Клас III – аеробалістична стабільність: снаряд із бічними або фронтальними повітрязабірниками має принципово інший профіль аеродинамічних моментів, що потребує нової теорії гіроскопічної стабілізації для тіл із несиметричним розподілом тиску.

КІЛЬКІСНИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ: МОДЕЛЬ СРК

Для об'єктивного порівняння зразків у роботі застосовано формалізовану модель ефективної вартості ураження цілі СРК. Модель ґрунтується на двовимірному нормальному законі розподілу точок падіння снаряда. Імовірність влучання в коло радіуса R_t при круговому ймовірному відхиленні СЕР визначається як:

$$P_{hit}(R_t, CEP) = 1 - \exp(-R_t^2 \cdot \ln 2 / CEP^2).$$

Ефективна вартість ураження однієї цілі з імовірністю $P_k = 0,90$ (стандарт «знищення» НАТО):

$$СРК = N_{req} \cdot C_{round} + C_{fixed},$$

$$де N_{req} = \left[\ln(1 - P_k) / \ln(1 - p_{eff}) \right],$$

де $p_{eff} = P_{hit} \cdot P_{fuse} \cdot P_{lethal}$ – ефективна імовірність знищення одним пострілом; $C_{fixed} = 10000$ USD – фіксовані витрати місії (цілевказівка, позиціонування). Параметри P_{fuse} та P_{lethal} прийнято: для некерованих – 0,97 та 0,15 (по бронетехніці); для керованих – 0,97-0,98 та 0,40-0,45. Розрахунок виконано для чотирьох класів типових цілей при дальності $D = 25$ км.

Зведені характеристики та результати розрахунку СРК наведено у табл. 1 і 2.

Аналіз таблиць 1–2 дозволяє сформулювати три операційних висновки. По-перше, некеровані снаряди (M795, K307, M549A1) є фізично неефективними проти точкових захищених цілей ($R_t = 3$ м): необхідна кількість пострілів перевищує 14 000–20 000 одиниць, що є абсолютно нереалістичним в оперативному контексті. По-друге, M795+PGK є домінуючим рішенням за критерієм СРК для цілей $R_t = 5$ –40 м: СРК \$72–112 К проти \$252–412 К для Excalibur при еквівалентному ефекті – різниця вартості (\$20 000 vs \$80 000 за снаряд) є фундаментальнішою, ніж різниця точності (СЕР 6 м – 7 м). По-третє, Vulcano GLR виправданий лише у вузькому класі завдань, де одночасно потрібні дальність понад 50 км і точність менше 5 м.

СЕМИРІВНЕВА ІЄРАРХІЯ НАУКОВИХ ЗАДАЧ

На основі проведеного аналізу пропонується ієрархія взаємопов'язаних дослідницьких задач, побудована від фундаментальних явищ до системної інтеграції. Логіка ієрархії полягає в тому, що результати кожного рівня є необхідними вхідними даними для наступного.

Рівень 1 – хімічна кінетика горіння при депресуризації. Задача: встановити кількісну залежність часу повторного запалювання t_d від складу суміші AP/HTPB та морфології піротехнічного ігнітора Mg/PTFE. Метод: DSC/TG-аналіз у поєднанні з ударно-трубними випробуваннями.

Рівень 2 – нестационарна CFD-аеродинаміка. Задача: моделювання взаємодії ВВ-струменя із зоною рециркуляції для обертового снаряда засобами RANS SST $k-\omega$ з Chimera-сіткою. Гіпотеза: обертання зміщує оптимальний параметр I від канонічного 0,005.

Рівень 3 – мультифізична модель міцності гібридних корпусів. Задача: зв'язана задача пружно-пластичної

Т а б л и ц я 1. Тактико-технічні характеристики сучасних 155-мм боєприпасів

Зразок	Тип	СЕР (м)	L/39 (км)	L/52 (км)	Вартість (USD)	СРК R=10м (USD)	ВР (кг)	ІМ
M795 HE	HE	~200	22–24	30	3 600	>5 000 000	10,5	Ні
K307 HE-BB	BB	~180	30	41	4 500	>4 500 000	9,8	Ні
M549A1 RAP	ARS	~267	30,1	-	3 200	>7 000 000	6,8	Ні
M795+PGK	HE+PGK	6	22–24	30	20 000	112 000	10,5	Ні
XM1113+LR-PGK	ARS+PGK	10	40	70	25 000	137 000	~6,0	Так
M982 Excalibur	GPS	7	40	50	80 000	412 000	22,0	Ні
Vulcano 155 GLR	GPS/SAL	5	50	70	~100 000	512 000	~15,0	-

Примітки: ІМ – нечутливий боєприпас (Insensitive Munitions); СРК розраховано для $P_k = 0,90$, ціль $R_t = 10$ м (вантажівка/відкрита гармата), $D = 25$ км, $C_{fixed} = 10000$ USD.

Т а б л и ц я 2. Ефективна вартість СРК (тис. USD) по чотирьох класах цілей ($P_k=0,90$)

Зразок	Танк/КП R = 3 м	Вантажівка R = 10 м	Взвод R = 40м	Батарей R = 150 м
M795 HE	>36 000	5 617	332	33
K307 HE-BB	>45 000	5 660	337	35
M549A1 RAP	>32 000	8 864	515	35
M795+PGK	292	112	72	72
XM1113+LR-PGK	1 012	137	87	87
M982 Excalibur	1 452	412	252	252
Vulcano 155 GLR	912	512	312	312

механіки та термодинаміки для конструкцій BB+SRM при 15 000–20 000 g. Метод: Abaqus + AUTODYN.

Рівень 4 – розширена 6-DOF модель зовнішньої балістики. Задача: введення нестационарної тяги BB/SRM/Ramjet у стандарт STANAG 4355 і розрахунок оновлених балістичних таблиць для гібридних систем. Результат – програмний модуль для бортових обчислювачів FDDCU.

Рівень 5 – оптимізація геометрії BB-генератора. Задача: замкнена задача оптимізації параметрів (R_{max} , L_i , d_e , профіль сопла) за критерієм максимізації середньої дальності методами суррогатного моделювання (Kriging/RBFNN). Очікуваний додатковий приріст від деформівних сопел – до 1,7 %.

Рівень 6 – теорія гібридної послідовної системи BB+SRM. Задача: формалізація аналітичної моделі «ефективного вікна» для кожного компонента як функції числа Маха та висоти польоту; встановлення умов переходу BB→SRM для максимізації інтегрального приросту дальності.

Рівень 7 – Ramjet 155 мм: від концепту до серійного виробництва. Задача: три паралельних треки – (а) нові паливні склади без утворення V_2O_3 при вмісті $V > 25$ %; (б) компактний повітрязабірник в калібрі 155 мм з мінімальними аеродинамічними втратами; (в) нова теорія гіроскопічної стабілізації тіл із несиметричним розподілом тиску. Горизонт: 2027–2030.

ВИСНОВКИ

1. Технологія Base Bleed є зрілою серійною технологією з технологічною стелею дальності 43–45 км для стволів L/52. Ключовим невирішеним питанням є варіативність часу повторного запалювання, що обмежує інтеграцію BB з модулями точного наведення.

2. APC з SRM дозволяє досягати 30–70 км залежно від конфігурації, але має фундаментальний компроміс між дальністю та масою ВР. Гібридна конструкція BB+SRM (V-LAP) є найбільш ефективним доступним рішенням: 67–76 км при вартості 6 000–9 000 USD.

3. Ramjet є єдиною технологією, здатною подолати бар'єр 70 км без критичної ерозії ствола. Льотні випробування 2022–2025 рр. підтверджують принципову реалізованість, але три класи фундаментальних проблем потребують систематичних досліджень з горизонтом 2027–2030 рр.

4. СРК-модель встановила контрінтуїтивний результат: M795+PGK є домінуючим рішенням за критерієм вартість/ефект для цілей $R_t = 5–40$ м – дешевший за Excalibur у 4 рази при практично еквівалентному результаті. Оптимальна стратегія – обґрунтоване змішування типів боєприпасів залежно від класу цілі.

5. Для вітчизняної оборонної науки найбільш доцільним є зосередження на рівнях 3–5 запропонованої ієрархії: мультифізичне моделювання корпусів, балістичні таблиці гібридних систем та оптимізація BB-генераторів. Ці напрями поєднують безпосередній прикладний вихід з наявною вітчизняною компетенцією.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Миронов В. И., Белецкий Л. К. Напряженное состояние и прочность твердотопливного заряда APC при комплексном нагружении. *Боєприпасы*. 1979. № 7. С. 18–21.
2. Расчетная оценка снижения ударных нагрузок, действующих на заряд РДТТ APC / Федосов А. А., Лудченко В. Г., Михалин А. А., Шейнин Б. Л. *Боєприпасы*. 1988. № 10. С. 16–18.
3. Математическая модель аномального воспламенения ракетного заряда в двигателе APC / Амосов А. П., Гордиенко Н. П., Колпаков В. А., Михалин А. А. *Боєприпасы*. 1987. № 5. С. 3–5.
4. Investigation of the Aerodynamic Benefits of Base Bleed Technology on Artillery Shells. *Proc. of SBMAC*. 2022.
5. Effects of Mg/PTFE pyrotechnic compositions on reignition characteristics of base bleed propellants and heating mechanism. *ResearchGate*. 2020. DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.004.
6. M549 – Rocket-assisted projectile. *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/M549>.
7. Army developing safer, extended range rocket-assisted artillery round. *U.S. Army official website*. 2016.
8. 155mm XM1113 Extended Range, Rocket Assisted Projectile. *General Dynamics Ordnance and Tactical Systems*. 2022.
9. Assegai V-LAP. *Deagel.com*. URL: <https://deagel.com/Weapons/Assegai-V-LAP/a000925>.
10. The range revolution. *Nammo official website*. 2023. URL: <https://www.nammo.com/story/the-range-revolution/>.
11. IIT Madras develops ramjet-assisted Artillery Shells to extend gun range without compromising lethality. *IIT Madras*. 2025.
12. *Aerospace Science and Technology*. Elsevier. Q1 Scopus.
13. *Defense Technology*. KeAi Publishing. Q1 Scopus.
14. A comparative analysis of contemporary 155 mm artillery projectiles. *J. of Defense Analytics and Logistics*. 2019. Vol. 3. № 2. Pp. 171–192.
15. M982 Excalibur. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/M982_Excalibur.
16. Live Firing and 3D Numerical Investigation of Base Bleed Exit Configuration Impact on Projectile Drag. *Advances in Military Technology*. 2022. Vol. 17. № 2. Pp. 319–334.

REFERENCES

1. Mironov, V.I. & Beletsky, L.K. (1979). “Napriagennoe sostoianie i prochnost tvedotoplevnogo zariada ARS pri kompleksnom napriagenii” [Stressed state and strength of a solid fuel charge of ARS under complex loading]. *Ammunition*. No. 7. Pp. 18–21.
2. Fedosov, A.A., Ludchenko, V.G., Mikhalyn, A.A. & Sheynin, B.L. (1988). “Raschetnaia otsinka snigeniia udarnykh nagruzok, deistvuiuchikh na zarad RDTT ARS” [Calculation assessment of the reduction of shock loads acting on the charge of ARD TT ARS]. *Ammunition*. No. 10. Pp. 16–18.
3. Amosov, A.P., Gordienko, N.P., Kolpakov, V.A. & Mikhalyn, A.A. “Matematichna model anomalnogo vosplameneniia raketnogo zariada v dvigune ARS” [Mathematical model of anomalous ignition of a rocket charge in an ARS engine]. *Ammunition*. 1987. No. 5. Pp. 3–5.

4. Investigation of the Aerodynamic Benefits of Base Bleed Technology on Artillery Shells. Proc. of SBMAC. 2022.
5. Effects of Mg/PTFE pyrotechnic compositions on reignition characteristics of base bleed propellants and heating mechanism. ResearchGate. 2020. DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.004.
6. M549 – Rocket-assisted projectile. Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/M549>.
7. Army developing safer, extended range rocket-assisted artillery round. U.S. Army official website. 2016.
8. 155mm XM1113 Extended Range, Rocket Assisted Projectile. General Dynamics Ordnance and Tactical Systems. 2022.
9. Assegai V-LAP. Deagel.com. URL: <https://deagel.com/Weapons/Assegai-V-LAP/a000925>.
10. The range revolution. Nammo official website. 2023. URL: <https://www.nammo.com/story/the-range-revolution/>.
11. IIT Madras develops ramjet-assisted Artillery Shells to extend gun range without compromising lethality. IIT Madras. 2025.
12. Aerospace Science and Technology. Elsevier. Q1 Scopus.
13. Defense Technology. KeAi Publishing. Q1 Scopus.
14. A comparative analysis of contemporary 155 mm artillery projectiles. J. of Defense Analytics and Logistics. 2019. Vol. 3. № 2. Pp. 171—192.
15. M982 Excalibur. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/M982_Excalibur.
16. Live Firing and 3D Numerical Investigation of Base Bleed Exit Configuration Impact on Projectile Drag. Advances in Military Technology. 2022. Vol. 17. № 2. Pp. 319—334.

**Maystrenko O.A., Ostapchuk E.S.,
Adamenko B.I., Timochko O.V.**

**TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE FIRING
RANGE OF ARTILLERY AMMUNITION: BOTTOM
GAS GENERATOR, ACTIVE-JET PROJECTILE
AND DIRECT-FLOW AIR-JET ENGINE –
COMPARATIVE ANALYSIS**

This paper presents a comprehensive comparative analysis of three technologies for increasing the range of 155-mm artillery projectiles: Base Bleed (BB), Rocket-Assisted Projectile (RAP) with solid rocket motor, and Ramjet propulsion. The physical mechanisms of aerodynamic drag reduction, solid propellant composition, design features, and aeroballistic properties are examined. Using a formalized Cost Per Kill (CPK) effectiveness model, a quantitative comparison of seven modern 155-mm munition systems by cost/range/accuracy criteria is performed. It is established that hybrid BB+SRM systems achieve 60–76 km range and are optimal by cost/effectiveness criteria for current gun artillery. Ramjet projectiles represent the only technology capable of reaching 100–150 km without critical barrel erosion but require resolution of fundamental scientific and technical problems. A seven-level research task hierarchy for implementing hybrid long-range systems is proposed.

Keywords: base bleed, rocket-assisted projectile, ramjet, firing range, aerodynamic drag, CPK model, 155-mm artillery, solid rocket propellant.

Відомості про авторів:

Майстренко Олександр Анатолійович
кандидат технічних наук
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9701-7359>
e-mail: alexia_g@ukr.net

Остапчук Едуард Станіславович
начальник відділу
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-8095-0203>

Адаменко Богдан Іванович
заступник директора
АТ «Компанія авіаційного та ракетно-технічного
машинобудування»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3814-3624>

Тимошко Олександр Вячеславович
головний конструктор
АТ «Компанія авіаційного та ракетно-технічного
машинобудування»
м. Київ, Україна

Information about the authors:

Maystrenko Olexandr
Candidate of Technical Sciences
Leading Research Fellow
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9701-7359>
e-mail: alexia_g@ukr.net

Ostapchuk Eduard
Head of Department
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-8095-0203>

Adamenko Bohdan
Deputy Director of JSC
«Aviation and Rocket Engineering Company»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3814-3624>

Tymoshko Olexandr
Chief Designer of JSC
«Aviation and Rocket Engineering Company»
Kyiv, Ukraine

Стаття надійшла до редколегії 02.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 621.396.965+621.391.26

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).32-43](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).32-43)

В. В. ТВЕРДОХЛІБОВ, кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

А. О. ПОПОВ, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

С. Д. ЗІБІН, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Л. В. БІЛОБОРОДОВА, ад'юнкт
<https://orcid.org/0000-0003-0335-240X>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧОТИРЬОХ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ НА ФОНІ ПЕРЕШКОД У РЛС З ПЛАНАРНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ

Досліджуються питання розв'язання задачі просторової фільтрації сигналів в умовах впливу спеціально організованих перешкод в антенній решітці з цифровою обробкою сигналів, при цьому в якості методів просторової фільтрації обрано методи максимальної правдоподібності, рекурентного формування оцінки кореляційної матриці, компенсації перешкод і логічної обробки сигналів. Підкреслюється, що алгоритми реалізації зазначених методів захисту РЛС від впливу перешкод є основою для створення діючих моделей функціонування сучасних наземних РЛС. Створені моделі використовуються для експериментального дослідження порівняльної ефективності обраних методів захисту РЛС з планарною антенною решіткою від впливу потужних перешкод, що здійснюється шляхом використання методу статистичних випробувань на ЕОМ.

Ключові слова: РЛС, радіоелектронне подавлення; захист РЛС від перешкод; просторова фільтрація сигналів; планарна антенна решітка; метод максимальної правдоподібності; метод рекурентного формування оцінки кореляційної матриці; метод компенсації перешкод; метод логічної обробки сигналів; алгоритм обробки сигналів; перешкода.

ВСТУП

В сучасних умовах розвиток та застосування озброєння та військової техніки (ОВТ) супроводжується вирішенням завдань виявлення об'єктів ураження, передачі

інформації, а також управління зброєю, насамперед, високоточною (ВТЗ). Завдання з виявлення таких об'єктів вирішується радіолокаційними системами, при цьому об'єктами (цілями радіолокаційного виявлення) в залежності від галузі застосування радіолокаційної системи можуть бути літаки, вертольоти, безпілотні літальні апарати (БпЛА) (аеродинамічні цілі), міни, снаряди, тактичні, оперативно-тактичні ракети, бойові головки балістичних ракет (балістичні цілі), наземні та надводні цілі та ін.

В ході ведення бойових дій радіолокаційні системи різного призначення функціонують в умовах радіоелектронного подавлення з боку противника. Тому, з одного боку, розробка радіолокаційних систем повинна передбачати забезпечення їх надійного радіоелектронного захисту, а з іншого, розробка засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) з радіолокаційними системами повинна передбачати обґрунтування вимог стосовно радіоелектронного подавлення таких систем.

Для обґрунтування технічних вимог до авіаційних засобів РЕБ (літаків або БпЛА), а також вимог щодо радіоелектронного захисту РЛС в ході їх розробки, необхідно мати моделі РЕБ з наземними РЛС або моделі функціонування РЛС в умовах впливу перешкод.

Робочими алгоритмами сучасних РЛС, які побудовані на основі антенних решіток з цифровою обробкою сигналів, передбачено використання багатьох відомих методів [1—10]. Алгоритми, які засновані на цих методах, добре зарекомендували себе в антенних решітках в умовах впливу перешкод з нормальним розподілом ймовірностей, але їх застосування в умовах сумісного впливу реальних шумових та вузькосмугових модульованих перешкод потребує окремого дослідження.

В роботі досліджуються питання розв'язання задачі просторової фільтрації сигналів в умовах впливу зазначених перешкод в антенній решітці з цифровою обробкою сигналів, при цьому в якості методів просторової фільтрації обрані методи максимальної правдоподібності (maximum likelihood method), рекурентного формування оцінки кореляційної матриці (recursive matrix inversion method), компенсації перешкод (side-lobe cancellation method) і логічної обробки сигналів (logic signal processing method / side-lobe blanking method). Алгоритми реалізації зазначених методів захисту РЛС від впливу перешкод є основою для створення моделей функціонування сучасних наземних РЛС. Застосування створених моделей для експериментального дослідження порівняльної ефективності обраних методів захисту РЛС з планарною антенною решіткою від впливу потужних перешкод здійснюється шляхом використання методу статистичних випробувань на ЕОМ.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження питань обробки сигналів на фоні перешкод, і зокрема, задачі просторової фільтрації сигналів, яка здійснюється в умовах перешкод, викладені в роботах [1—10]. Основи побудови систем радіолокації добре викладені у монографіях [11—18]. У циклі статей [19—21] розглядаються адаптивні системи захисту РЛС від шумових перешкод. У [19] показано, що швидкодія кореляційних автокомпенсаторів перешкод

сильно залежить від ступеню складності перешкодової обстановки (кількості, координат і інтенсивності шумових перешкод). У [20] розглянуті квазіньютонівські алгоритми адаптації на основі оцінок максимальної правдоподібності просторових кореляційних матриць шумових перешкод, швидкодія яких не залежить від ступеню складності перешкодової обстановки. У [21] наводиться математична модель системи просторової обробки сигналів на фоні перешкод в РЛС із планарною антенною решіткою. Спосіб підвищення швидкодії адаптивних систем обробки сигналів на основі максимально правдоподібної оцінки периметричної кореляційної матриці перешкод розглядається у роботі [22].

Загальні методичні підходи стосовно оцінки ефективності зразків ОБТ містяться у роботах [24—26]. Основи застосування методу статистичних випробувань представлено в роботах [27—29]. Сучасні погляди стосовно моделювання впливу перешкод на РЛС розглянуті в роботах [30—33, 39]. Методи максимальної правдоподібності та рекурентного формування оцінки кореляційної матриці викладені у роботах [5—8]. Використання методу компенсації перешкод у антенних решітках наведено у джерелах [11, 12] Метод логічної обробки сигналів у антенних решітках викладено у [11, 12, 23].

Метою роботи є по-перше, створення діючих моделей захисту РЛС з планарною антенною решіткою від впливу перешкод на основі чотирьох відомих методів просторової фільтрації сигналів; по-друге, застосування створених моделей для експериментального дослідження порівняльної ефективності обраних методів захисту РЛС з планарною антенною решіткою від впливу потужних перешкод в умовах поганої обумовленості кореляційної матриці вхідних сигналів; по-третє, вибір найбільш ефективних видів перешкод для забезпечення радіоелектронного подавлення наземних РЛС шляхом їх подальшого застосування у засобах РЕБ повітряного базування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У задачах просторово-часової обробки сигналів у антенних системах (у тому числі, в антенних решітках) виникає необхідність розгляду випадкових функцій декількох змінних, які називаються випадковими полями або багатомірними сигналами. В роботі під задачею просторової фільтрації (виділення) сигналу будемо розуміти визначення оцінки $\hat{s}(t)$ сигналу $s(t)$ як функціоналу $F_S[\xi(\mathbf{r}, t)]$ від спостережуваної реалізації $\xi(\mathbf{r}, t)$, $t \in T_S$:

$$\hat{s}(t) = F_S[\xi(\mathbf{r}, t)], t \in T_S,$$

де $\xi(\mathbf{r}, t)$ – випадкове поле (векторне або скалярне); \mathbf{r} – m -мірний вектор зі своїми проекціями у вибраній системі координат.

Планарні антенні решітки з електронним способом сканування простору

Планарна антенна решітка з прямокутним розміщенням елементів являє собою об'єднання елементів M лінійних антенних решіток, розташованих на M прямих, паралельних осі Ox (рис. 1), при цьому на кожній з прямих розміщуються по N елементів [34]. Результуючий процес $y(t)$ на виході пристрою обробки сигналів планарною антеною решіткою визначається виразом [7, 8]:

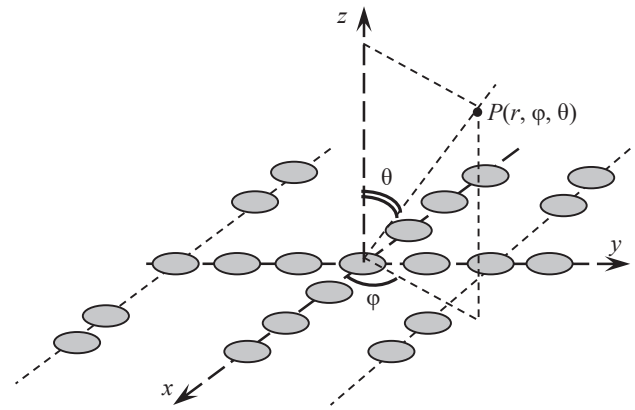


Рис. 1. Основні геометричні співвідношення в планарній антенній решітці

$$y(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{w}_{nm} a_{nm}(t), \quad (1)$$

де $a_{nm}(t)$ – прийняті сигнали на вході nm -го приймального елемента планарної антенної решітки; w_{nm} – вагові коефіцієнти в nm -му каналі обробки антенної решітки; $\bar{w}_{nm} = \text{Re}(w_{nm}) - j \text{Im}(w_{nm})$; N, M – кількість елементів решітки по координатним осям Ox, Oy відповідно.

Діаграма направленості (ДН) $F(\varphi, \theta)$ планарної антенної решітки визначається виразами [8, 34, 35]:

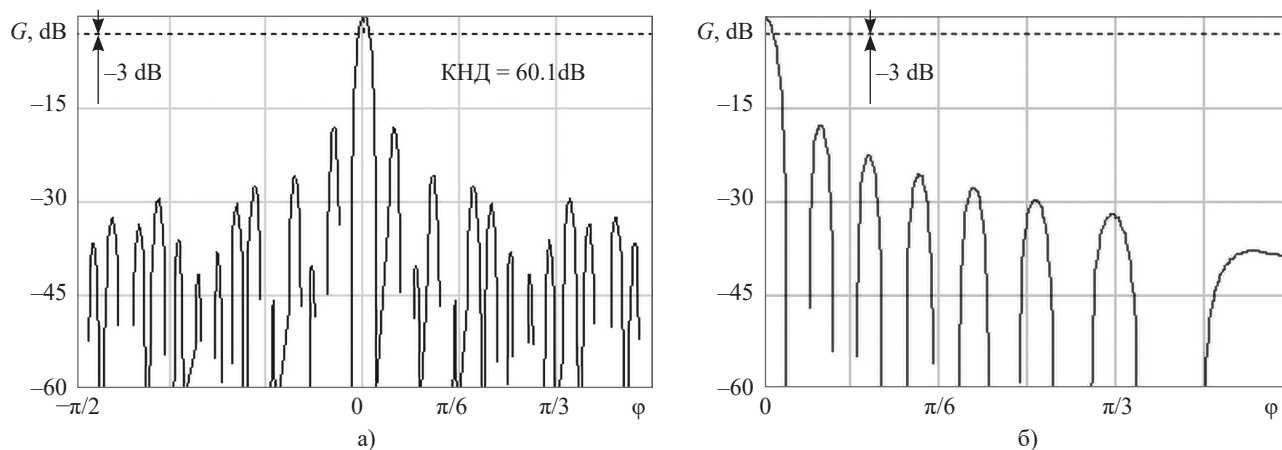
$$F(\varphi, \theta) = F_0(\varphi, \theta) \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{nm} \cdot \exp \left[j2\pi \left\{ \begin{array}{l} n \frac{dx}{\lambda} (u - u_S) + \\ m \frac{dy}{\lambda} (v - v_S) \end{array} \right\} \right], \quad (2)$$

$$\begin{cases} u = \sin \theta \cos \varphi; \\ u_S = \sin \theta_S \cos \varphi_S; \end{cases} \quad \begin{cases} v = \sin \theta \sin \varphi; \\ v_S = \sin \theta_S \sin \varphi_S; \end{cases} \quad (3)$$

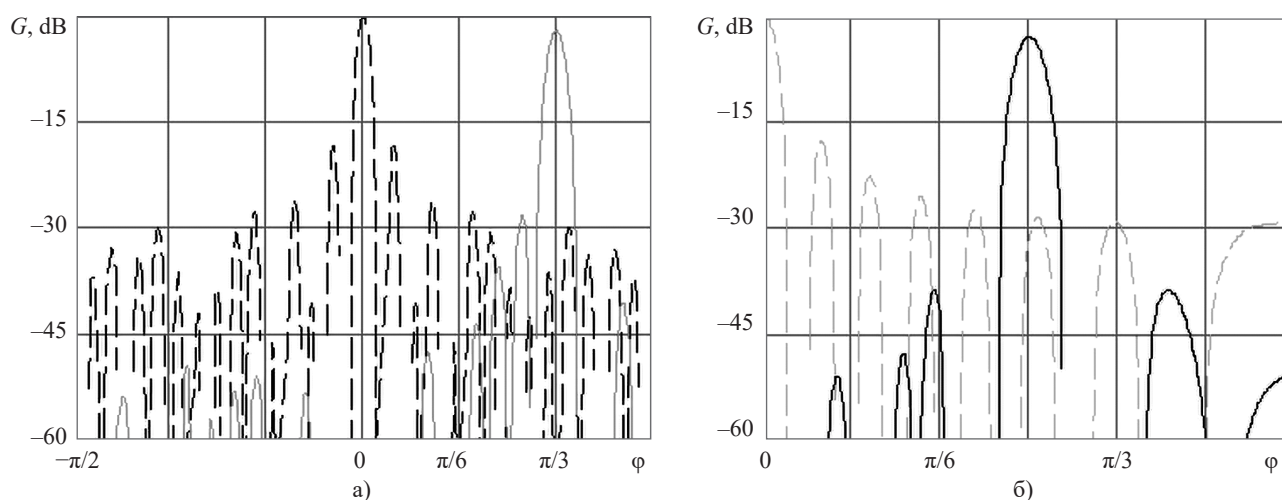
де N, M – кількість елементів решітки по координатним осям Ox, Oy відповідно; d_x, d_y – міжелементна відстань решітки по координатним осям Ox, Oy відповідно; λ – робоча довжина хвилі; $F_0(\varphi, \theta)$ – діаграма направленості окремого елемента решітки; φ_S, θ_S – координати головної пелюстки ДН решітки, при електронному управлінні його положенням; w_{nm} – комплексні вагові коефіцієнти, що застосовуються при цифровій обробці сигналів в решітці.

На рис. 2а, б наведено перетини нормованих діаграм направленості планарної антенної решітки з кількістю елементів 29×35 , отримані на основі співвідношень (2), (3) в горизонтальній та вертикальній площинах відповідно. Ширина ДН $F_0(\varphi, \theta)$ окремого елемента решітки забезпечувалась на рівні 120° в азимутальній та кутомірній площинах на рівні -3 дБ від максимуму. Зазначений варіант побудови антенної решітки забезпечує коефіцієнт направленої дії (КНД) $60,1$ дБ; міжелементні відстані d_x, d_y решітки по координатним осям Ox, Oy дорівнювали $d_x = d_y = 0,5\lambda$, при цьому забезпечувалась ширина головної пелюстки ДН $3,4^\circ$ та $3,5^\circ$ відповідно на рівні -3 дБ від максимуму.

На рис. 3 наведено перетини діаграм направленості планарної антенної решітки з кількістю елементів 29×35 з електронним способом сканування простору у двох координатних площинах, при цьому положення головної



Р и с . 2. Перетини нормованих діаграм направленості планарної антенної решітки розміром 29 x 35 елементів: а) у горизонтальній площині; б) у вертикальній площині



Р и с . 3. Перетини діаграм направленості планарної антенної решітки розміром 29 x 35 елементів з електронним способом сканування простору у двох координатних площинах: а) у горизонтальній площині; б) у вертикальній площині

пелюстки ДН в азимутальній та кутомірній площинах визначається координатами $\varphi_s = \pi/3$; $\varepsilon_s = \pi/4$ відповідно, що показано суцільною лінією. Вихідне положення ДН решітки, що відповідає координатам $\varphi_s = 0$; $\varepsilon_s = 0$, показано штриховою лінією. З рис. 3 можна бачити, що в разі реалізації електронного способу сканування простору головною пелюсткою ДН ситуація із забезпеченням основних параметрів антен дещо погіршується, що пов'язано із розширенням ширини ДН решітки в горизонтальній та вертикальній площинах.

Просторова фільтрація сигналів на фоні перешкод у планарній антенній решітці. Метод максимальної правдоподібності

Розглянемо задачу просторової фільтрації вузькосмугового корисного сигналу, яка розв'язується вузькосмуговою планарною антенною решіткою (рис. 1) розміром $N \times M$ елементів.

Нехай на вході nm -го елемента антенної решітки спостерігається адитивна суміш $a_{nm}(t)$ корисного сигналу $s(t)$, L комплексних вузькосмугових перешкодових сигналів $u_l(t)$, кожний з яких приходить від l -го точкового джерела, і комплексного квазібілого гауссівського шуму $n(t)$ з нульовим середнім:

$$a_{nm}(t) = s_{nm}(t) + \sum_{l=1}^L u_{nm,l}(t) + n_{nm}(t) = s(t, \omega_s) \exp \left[-j2\pi \frac{f_s}{f_0} \frac{d}{\lambda_0} \left[\begin{matrix} n \sin \theta_s \cos \varphi_s + \\ + m \sin \theta_s \sin \varphi_s \end{matrix} \right] \right] + \sum_{l=1}^L u_l(t, \omega_l) \exp \left[-j2\pi \frac{f_l}{f_0} \frac{d}{\lambda_0} \left[\begin{matrix} n \sin \theta_l \cos \varphi_l + \\ + m \sin \theta_l \sin \varphi_l \end{matrix} \right] \right] + n_{nm}(t), \quad (4)$$

де $t = t_i = t_0 + i \cdot \Delta t$; $i = 0, 1, \dots, I-1$; Δt – інтервал дискретизації сигналів; $s_{nm}(t)$ – корисний сигнал $s(t)$, спостережуваний в nm -му каналі антенної решітки; $\omega_s = 2\pi f_s = \text{const}$, f_s – несуча частота корисного сигналу $s(t)$; (θ_s, φ_s) – напрямки приходу сигналу $s(t)$; (θ_l, φ_l) – напрямки приходу перешкодового сигналу $u_l(t)$; $\omega_l = 2\pi f_l = \text{const}$, f_l – несуча частота перешкодового сигналу $u_l(t)$, який спостерігається в nm -му каналі антенної решітки; частоти $\{f_l\}$ сигналів $\{u_l(t)\}$ і несуча частота f_s корисного сигналу $s(t)$ є різними, і розподілені в деякому інтервалі: $f_l, f_s \in [f_{\min}, f_{\max}]$, $f_0 \leq f_{\min}$,

$f_{\max} / f_{\min} \in [1.05, 1.10]$; $n_{nm}(t) = n_{nm}^c(t) + j \cdot n_{nm}^s(t)$ – шум, спостережуваний в nm -му каналі антенної решітки, $j = \sqrt{-1}$; $\mathbf{M}\{u_l(t)u_k(t)\} = 0, l \neq k$; $\mathbf{M}\{n_{n1m1}(t)n_{n2m2}(t)\} = 0, n1m1 \neq n2m2$; $\mathbf{M}\{*\}$ – символ математичного очікування; $\mathbf{M}\{(n_{nm}^c(t))^2\} = \mathbf{M}\{(n_{nm}^s(t))^2\} = D_n / 2$, D_n – дисперсія комплексного квазібілого гауссівського шуму $n_{nm}(t)$ з нульовим середнім; d – міжелементна відстань антенної решітки, $d = 0,5\lambda_0$, де λ_0 – довжина хвилі сигналу, яка відповідає мінімальній частоті оброблюваних сигналів $f_0 \leq f_{\min}$.

Результуючий процес $y(t)$ на виході пристрою обробки сигналів планарної антенної решітки розміром $N \times M$ елементів (рис. 1) визначається зваженою сумою сигналів у приймальних каналах $a_{nm}(t)$ [7, 8]:

$$y(t) = \mathbf{a}(t)\bar{\mathbf{w}}, \quad (5)$$

де $t = t_m = t_0 + m \cdot \Delta t$; $m = 0, 1, \dots, M-1$; Δt – інтервал дискретизації сигналів; $\mathbf{a}(t) = \|a_{nm}(t)\|$ – матриця прийнятого сигналу на входах nm -го приймальних елементів планарної антенної решітки (див. формулу (4)) розміром $I \times (NM)$ елементів; $\mathbf{w} = \|w_k\|$ – вектор вагових коефіцієнтів в nm -му каналі обробки; $\bar{w}_k = \text{Re}(w_k) - j \text{Im}(w_k)$; $k = nM + m$.

Відповідно до алгоритму просторової фільтрації (5), з результатів спостережень $\mathbf{a}(t) = \|a_{nm}(t)\|$ на вході nm -го елемента антенної решітки (4) необхідно сформувати матрицю вхідних сигналів розміром $I \times (NM)$:

$$\mathbf{a}(t) = \mathbf{A} = \|a_{i, n \cdot M + m}\| = \begin{bmatrix} a_{0,0} & \dots & a_{0, NM-1} \\ a_{1,0} & \dots & a_{1, NM-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I-1,0} & \dots & a_{I-1, NM-1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $t = t_i = t_0 + i \cdot \Delta t$; $i = 0, 1, \dots, I-1$; $n = 0, 1, \dots, N-1$; $m = 0, 1, \dots, M-1$.

Тоді оцінка $\hat{\mathbf{R}}_a$ кореляційної матриці \mathbf{R}_a , яка сформована на основі спостережуваних процесів (4), буде мати розмірність $(N \cdot M) \times (N \cdot M)$:

$$\hat{\mathbf{R}}_a = \left\| R_{r,c}^a \right\| = \frac{1}{I} \left\| \left(\mathbf{A}^{<r>} \right)^T \mathbf{A}^{<c>} \right\|, \quad (7)$$

де $r = 0, 1, \dots, N \cdot M - 1$; $c = 0, 1, \dots, N \cdot M - 1$; $\mathbf{A}^{<c>}$ – вектор, утворений c -им стовпцем матриці \mathbf{A} (6).

Здійснення прямої інверсії кореляційної матриці (7) при значній кількості елементів планарної антенної решітки $N \cdot M > 100 \dots 300$ як правило, супроводжується проблемою поганої обумовленості матриці $\hat{\mathbf{R}}_a$, яка виникає внаслідок великої розкиданості власних чисел матриці $\hat{\mathbf{R}}_a$:

$$|\lambda_{\max}| / |\lambda_{\min}| \gg 1,$$

де $\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ – найбільше та найменше по модулю власні числа матриці $\hat{\mathbf{R}}_a$.

Для усунення такої проблеми застосовуються спеціальні методи [36, 37]. В роботі для досягнення такої мети використовується метод регуляризації Тихонова А.Н. [38], який дозволяє модифікувати вихідну кореляційну матрицю.

Антенна решітка, що працює на основі критерію максимальної правдоподібності (maximum likelihood method), формує оптимальне рішення для вектора вагових коефіцієнтів \mathbf{w} у вигляді [7, 8]:

$$\mathbf{w} = [w_0, \dots, w_{N \cdot M - 1}]^T = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s)}{\mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s)^T \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s)}; \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{R}}_a + \varepsilon \cdot \mathbf{I};$$

$$\mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s) = \|\mathbf{e}_{nM+m}\| = \quad (9)$$

$$= \left\| \exp \left(-j2\pi \frac{f_s}{f_0} \frac{d}{\lambda_0} [n \sin \theta_s \cos \varphi_s + m \sin \theta_s \sin \varphi_s] \right) \right\|$$

де $\hat{\mathbf{R}}$ – модифікована (по Тихонову) оцінка кореляційної матриці $\mathbf{R}_a = \|R_{r,c}\|$; $\hat{\mathbf{R}}_a$ – оцінка (7) кореляційної матриці \mathbf{R}_a спостережуваних процесів (4); $\mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s)$ – вектор комплексних просторових гармонік (керуючий вектор), як функція від напрямку приходу (φ_s, θ_s) сигналу $s(t)$; \mathbf{I} – одинична матриця; δ_{ik} – символ Кронекера: $\delta_{ik} = 1$, якщо $i = k$; $\delta_{ik} = 0$, якщо $i \neq k$; $c = \text{const}$; $\varepsilon = \text{const}$; $\varepsilon \ll R_{r,r}$.

Просторова фільтрація сигналів на фоні перешкод у планарній антенній решітці. Рекурентний метод формування оцінки кореляційної матриці

Розглянемо алгоритм адаптивної просторової фільтрації сигналів, побудований на рекурентному методі формування оцінки кореляційної матриці (recursive matrix inversion method).

Через обмеженість обчислювальних ресурсів системи буває вкрай бажано уникнути складностей, пов'язаних з безпосереднім знаходженням оберненої кореляційної матриці (7), яка фігурує у (8). Для успішного вирішення обчислювальних проблем може бути використаний інший клас алгоритмів, заснованих на рекурентному методі обробки [7, 8]. Адаптивний алгоритм, заснований на методі рекурентної інверсії кореляційної матриці [8], має такий вигляд:

$$\mathbf{w}(t_i) = [w_0(t_i), \dots, w_{NM-1}(t_i)]^T = \frac{1}{1-\beta} \left[\mathbf{w}(t_{i-1}) - \mathbf{k} \left[\left(\mathbf{A}^T \right)^{\langle i \rangle} \right]^T \mathbf{w}(t_{i-1}) \right]; \quad (10)$$

$$\mathbf{k} = \frac{\beta \Phi_a(t_{i-1}) \left(\mathbf{A}^T \right)^{\langle i \rangle}}{(1-\beta) + \beta \left[\left(\mathbf{A}^T \right)^{\langle i \rangle} \right]^T \Phi_a(t_{i-1}) \left(\mathbf{A}^T \right)^{\langle i \rangle}}; \quad (11a)$$

$$\Phi_a(t_i) = \frac{1}{1-\beta} \left[\Phi_a(t_{i-1}) - \mathbf{k} \left[\left(\mathbf{A}^T \right)^{\langle i \rangle} \right]^T \Phi_a(t_{i-1}) \right]; \quad (11b)$$

$$\Phi_a(t_0) = \hat{\mathbf{R}}_a^{-1}(t_0) = c \cdot \mathbf{I}, \quad \mathbf{I} = [\delta_{ik}]; \quad (11в)$$

$$\mathbf{w}(t_0) = \mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s); \quad (11г)$$

$$y(t) = \overline{\mathbf{w}^T(t)} \left(\mathbf{A}^T \right)^{\langle i \rangle}, \quad (12)$$

де $t = t_i = t_0 + i \cdot \Delta t$; $i = 0, 1, \dots, I-1$; Δt – інтервал дискретизації сигналів; I – число відліків, використовуваних при обробці; $\mathbf{A} = \mathbf{a}(t) = \|a_{nm}(t)\|$ – матриця прийнятого сигналу на входах nm -го приймальних елементів планарної антенної решітки (див. формулу (6)) розміром $I \times (NM)$ елементів; співвідношення (11a) визначає вектор коефіцієнта підсилення розмірності $(NM) \times 1$; співвідношення

(11б) визначає ітеративну зміну матриці $\Phi_a(t) = \hat{\mathbf{R}}_a^{-1}(t)$; $\hat{\mathbf{R}}_a(t)$ – оцінка кореляційної матриці прийнятого сигналу $\mathbf{A} = \mathbf{a}(t) = \|a_{nm}(t)\|$ (6); $\mathbf{A}^{(i)}$ – i -й стовпчик матриці \mathbf{A} ; β – відносна вага значимості поточних даних, яка вибирається, виходячи з параметрів кореляційної матриці \mathbf{R}_a : $0 < \beta < 1 / (10 \text{tr}(\mathbf{R}_a))$ або $0 < \beta < 1 / 10 \lambda_{\max}$, де $\text{tr}(\mathbf{R}_a)$ – слід матриці \mathbf{R}_a ; λ_{\max} – максимальне власнезначення матриці \mathbf{R}_a ; співвідношення (11в), (11г) визначають початкові умови для кореляційної матриці та вектора вагових коефіцієнтів відповідно; \mathbf{I} – одинична матриця; δ_{ik} – символ Кронекера: $\delta_{ik} = 1$, якщо $i = k$; $\delta_{ik} = 0$, якщо $i \neq k$; $c = \text{const}$.

Просторова фільтрація сигналів на фоні перешкод у планарній антенній решітці. Метод компенсації перешкод

Метод компенсації перешкод (side-lobe cancellation method) заснований на використанні частини приймальних каналів $n_{aux} < NM$ планарної антенної решітки для формування оцінки результуючої перешкоди та її компенсації з оцінки корисного сигналу [11, 12]:

$$y(t) = y_m(t) - \mathbf{A}_{aux} \cdot \bar{\mathbf{w}}_{aux}; \tag{13}$$

$$y_m(t) = \mathbf{A} \mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s); \tag{14}$$

$$\mathbf{w}_{aux} = \hat{\mathbf{R}}_{aux}^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{ma}; \tag{15}$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{aux} = \left\| R_{r,c}^{aux} \right\| = \frac{1}{I} \left\| \left(\mathbf{A}^{(r)} \right)^T \overline{\mathbf{A}^{(c)}} \right\|; \tag{15a}$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{ma} = \left\| P_r^{ma} \right\| = \frac{1}{I} \left\| \left(\mathbf{A}^{(r)} \right)^T \bar{y}_m(t) \right\|; \tag{15b}$$

де $\mathbf{a}_{aux}(t) = \mathbf{A}_{aux} = \|a_{nm}^{aux}(t)\|$, $\mathbf{A}_{aux} \subset \mathbf{A}$ – матриця сигналів допоміжних каналів прийому, $n = 0, 1, \dots, n_{aux} - 1$; $m = 0, 1, \dots, n_{aux} - 1$; \mathbf{w}_{aux} – ваговий вектор допоміжних каналів прийому; $y_m(t)$ – оцінка корисного сигналу $s(t)$, який приймається на фоні перешкод та формується на основі співвідношення (14); I – число відліків сигналів, які використовуються при обробці; $\mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s)$ – вектор комплексних просторових гармонік (керуючий вектор), як функція від напрямків приходу (φ_s, θ_s) сигналу $s(t)$; $\hat{\mathbf{R}}_{aux}$ – оцінка кореляційної матриці \mathbf{R}_{aux} спостережуваних процесів (6) в допоміжних каналах прийому розмірності $n_{aux} \times n_{aux}$; $\mathbf{A}^{(r)}$ – вектор, утворений r -м стовпцем матриці сигналів \mathbf{A}_{aux} у допоміжних каналах прийому, яка складається з відповідних елементів матриці \mathbf{A} (6); $\hat{\mathbf{P}}_{ma}$ – оцінка кореляційного вектора \mathbf{P}_{ma} розмірності $n_{aux} \times 1$ між сигналами у допоміжних каналах прийому та сигналом $y_m(t)$.

Просторова фільтрація сигналів на фоні перешкод у планарній антенній решітці. Метод логічної обробки сигналів

Двоканальні системи з так званою логічною обробкою сигналів (logic signal processing/ side-lobe blanking method) [11, 12, 23] (або зі схемою селекції приймання сигналів по головній пелюстці діаграми направленості), що складаються з направленої (основний) і ненаправленої (допоміжної) антен, дозволяють здійснювати приймання корисних сигналів по головній пелюстці діаграми направленості основної антени, при цьому виключаючи з обробки перешкодові сигнали, прийня-

ті по бічних пелюстках діаграми направленості основної антени. Можливість використання такого підходу до обробки сигналів ґрунтується на припущенні, що співвідношення сигнал-перешкода в основному каналі приймання суттєво вище, ніж співвідношення сигнал-перешкода в допоміжному каналі приймання.

Двоканальні системи з логічною обробкою сигналів знайшли застосування у таких зразках ОБТ радіоелектронної розвідки (РЕР) та РЕБ як: станції РЕБ СПН-30 (різних модифікацій), «Красуха-4»; станції РЕР СДР-2 (різних модифікацій), «Кольчуга-М», «Синтез-М», 85В6- (А,Е), «Автобаза-М». Інша назва таких систем – апаратура селекції сигналів, прийнятих по головному пелюстку діаграми направленості антенної системи.

Метод логічної обробки сигналів може бути реалізований також на основі антенних решіток [23]. Так, наприклад, для лінійної антенної решітки формується оцінка $y(t) = \hat{s}(t)$ корисного сигналу $s(t)$ шляхом порівняння сигналів в основному та допоміжному каналах прийому відповідно до загального алгоритму обробки [12, 23]:

$$y(t) = y_m(t) \cdot 1[|y_m(t)| - \mu |y_{aux}(t)|] = \begin{cases} y_m(t), & |y_m(t)| > |y_{aux}(t)|; \\ 0, & |y_m(t)| \leq |y_{aux}(t)|, \end{cases} \tag{16}$$

$$y_m(t) = \mathbf{A} \mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s), \tag{17}$$

де $1(t)$ – одинична східчаста функція Хевісайда; $y_m(t)$ – оцінка корисного сигналу $s(t)$, який приймається на фоні перешкод, та формується на основі співвідношення (17); $\mathbf{A} = \mathbf{a}(t) = \|a_{nm}(t)\|$ – матриця прийнятого сигналу на входах nm -го приймальних елементів планарної антенної решітки (див. формулу (6)) розміром $I \times (NM)$ елементів; $\mathbf{e}(\varphi_s, \theta_s)$ – вектор комплексних просторових гармонік (керуючий вектор), як функція від напрямків приходу (φ_s, θ_s) сигналу $s(t)$; $\mu = \text{const}$; $y_{aux}(t)$ – сигнал допоміжного каналу приймання, який формується відповідно до співвідношення [23]:

$$y_{aux}(t) = \min_{n,m} \left(a_{nm}^{aux}(t) \right), \tag{18}$$

$a_{nm}^{aux}(t)$ – сигнал на вході nm -го прийомного елемента антенної решітки, $n = 0, 1, \dots, n_{aux} - 1$; $m = 0, 1, \dots, n_{aux} - 1$, $a_{nm}^{aux}(t) \in \mathbf{A}_{aux} = \|a_{nm}^{aux}(t)\|$, \mathbf{A}_{aux} – матриця сигналів допоміжних каналів прийому $\mathbf{A}_{aux} \subset \mathbf{A}$.

Експериментальна оцінка порівняльної ефективності чотирьох методів захисту РЛС з планарною антенною решіткою від перешкод

Нехай на входах вузькосмугової планарної антенної решітки з 29 x 35 елементами спостерігається адитивна суміш (4) корисного сигналу $s(t)$, що приходить із напрямку $(\varphi_s, \theta_s) = (\pi/3, \pi/4)$, перешкодових сигналів $u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t), u_5(t)$, що приходять із напрямків $(\varphi_1, \theta_1) = (\pi/6, \pi/9)$; $(\varphi_2, \theta_2) = (-2\pi/9, 2\pi/15)$; $(\varphi_3, \theta_3) = (-\pi/3, \pi/12)$; $(\varphi_4, \theta_4) = (3\pi/7, 3\pi/41)$; $(\varphi_5, \theta_5) = (-2\pi/5, \pi/10)$ відповідно (див. рис. 4), а також некорельованого квазібілого гауссівського шуму $n(t)$, що діє в каналах приймання антенної решітки. Перешкодові сигнали $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ являють собою амплітудно-модульовану, частотно-модульовану перешкоди, а також

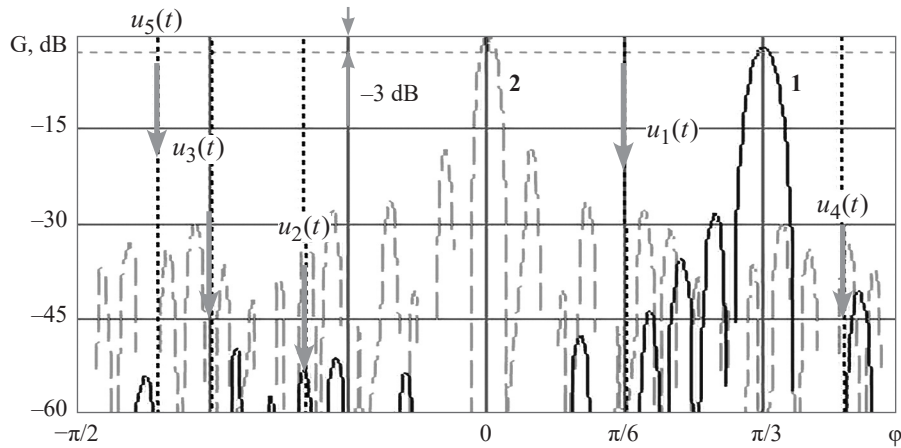
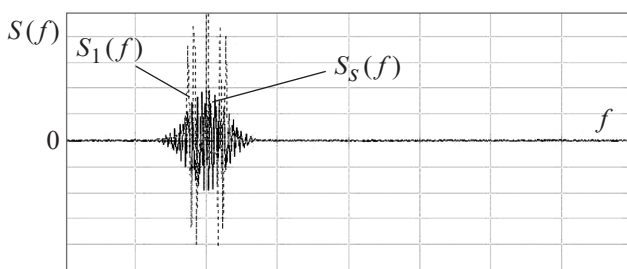


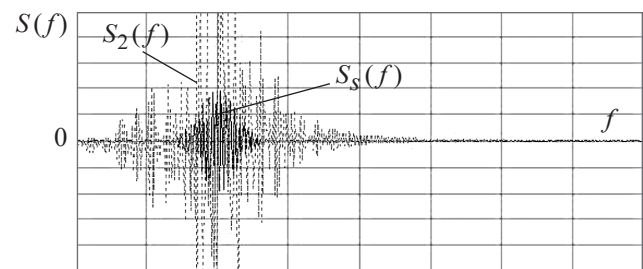
Рис. 4. Нормована діаграма направленості планарної антенної решітки з 29×35 елементами: 1 – налаштованої на сигнал; 2 – загальний вигляд; а також напрямки приходу перешкод

радіоімпульс із прямокутною обвідною; а некорельовані перешкоди $u_4(t)$, $u_5(t)$ являють собою квазібілий гауссівський шум. Спектри реалізацій $S_S(f)$, $S_1(f)$, $S_2(f)$, $S_3(f)$, $S_4(f)$ корисного $s(t)$ та перешкодових сигналів $n_1(t)$, $n_2(t)$, $n_3(t)$, $n_4(t)$, отриманих в результаті їх дискретного косинус перетворення, показано на рис. 5а,б,в,г відповідно. Співвідношення сигнал-шум в окремому nm -му приймальному каналі антенної решітки складає величину 40 дБ. Частоти прийнятих перешкодових і корисного сигналів розподілені в деякому інтервалі: $[f_{\min}, f_{\max}]$, $f_0 \leq f_{\min}$, $f_{\max} / f_{\min} \approx 1.10$; міжелементна відстань антенної решітки $d = 0.5\lambda_0$, де λ_0 довжина хвилі сигналу, яка відповідає мінімальній частоті оброблюваних сигналів $f_0 \leq f_{\min}$. Число відліків I сигналів $a_{nm}(t)$ (4), які використовуються при обробці, обране рівним $I = 512$.

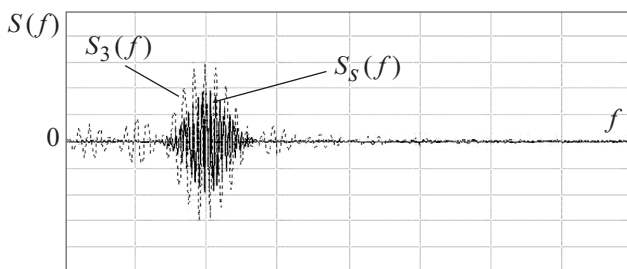
Кількість n_{aux} допоміжних каналів прийому, які використовуються у методах компенсації перешкод (13)... (15) і логічної обробки сигналів (16)...(18), дорівнює 9: $n_{aux} = 9$.



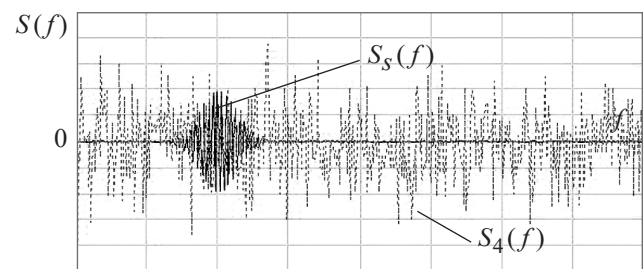
а)



б)



в)

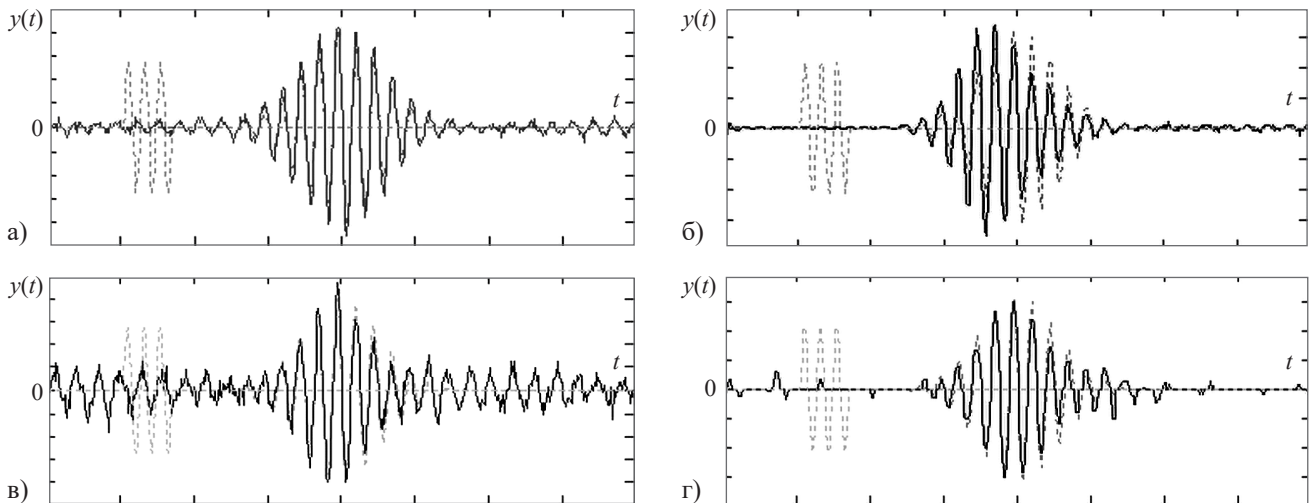


г)

Рис. 5. Спектри реалізацій корисного та перешкодових сигналів: а) сигналу та амплітудно-модульованої перешкоди; б) сигналу та частотно-модульованої перешкоди; в) сигналу та імпульсної радіочастотної перешкоди; г) сигналу та шумової перешкоди

На рис. 6а,б,в,г показані оцінки $y(t) = \hat{s}(t)$ корисного сигналу $s(t)$, які сформовані відповідно до алгоритмів просторової фільтрації (5), (12), (13), (16) для чотирьох методів відповідно. На вході антенної решітки крім корисного сигналу $s(t)$, діють амплітудно-модульована $u_1(t)$ та частотно-модульована $u_2(t)$ перешкоди, імпульсна перешкода $u_3(t)$, а також шумові перешкоди $u_4(t)$, $u_5(t)$. Співвідношення сигнал-перешкода SJR при цьому дорівнювали відповідно: $SJR_1 = SJR_2 = -10$ дБ; $SJR_4 = SJR_5 = -30$ дБ; $SJR_3 = -10$ дБ. Співвідношення сигнал-шум SNR складало величину 40 дБ. Співвідношення сигнал-перешкода (сигнал-шум) визначалось як відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності перешкоди (шуму).

Тут і в подальшому корисний сигнал показаний пунктиром, результат фільтрації показаний суцільною лінією, імпульсна перешкода $u_3(t)$ для зручності сприйняття показана пунктиром зі зменшенням масштабу по амплітуді в 10 разів. Показники якості обробки сигналів наведені у табл. 1.



Р и с . 6. Сигнали на виходах планарних антенних решіток з 29 x 35 елементами, в яких реалізуються методи: а) максимальної правдоподібності на основі безпосередньої інверсії кореляційної матриці (5); б) рекурентного формування оцінки кореляційної матриці (12); в) компенсації перешкод (13); г) логічної обробки сигналів (16)

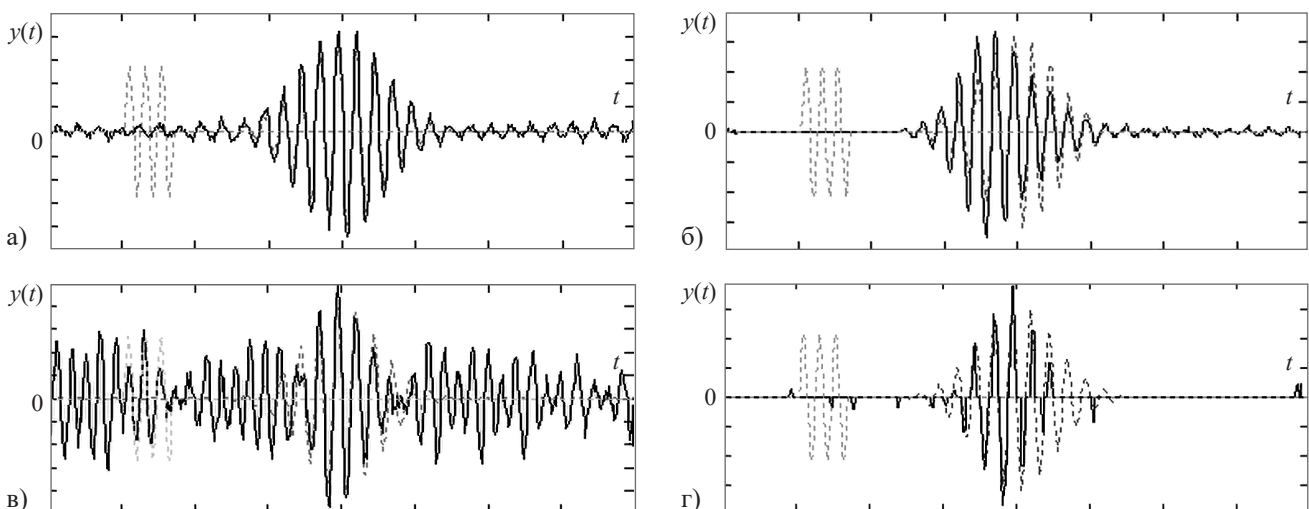
На рис. 7а,б,в,г показані оцінки $y(t)=\hat{s}(t)$ корисного сигналу $s(t)$, які сформовані відповідно до алгоритмів просторової фільтрації (5), (12), (13), (16) для чотирьох методів відповідно. На вході антенної решітки крім корисного сигналу $s(t)$, діють амплітудно-модульована перешкода $n_1(t)$, частотно-модульована перешкода $n_2(t)$, імпульсна перешкода $u_3(t)$ та шумові перешкоди $u_4(t)$, $u_5(t)$. Співвідношення сигнал-перешкода SJR при цьому дорівнювали відповідно: $SJR_1=SJR_2=-10$ дБ; $SJR_4=SJR_5=-40$ дБ; $SJR_3=-10$ дБ. Співвідношення сигнал-шум SNR складало величину 40 дБ.

На рис. 8а,б,в,г показані оцінки $y(t)=\hat{s}(t)$ корисного сигналу $s(t)$, які сформовані відповідно до алгоритмів просторової фільтрації (5), (12), (13), (16) для чотирьох методів відповідно. На вході антенної решітки, крім корисного сигналу $s(t)$, діють амплітудно-модульована перешкода $n_1(t)$, частотно-модульована перешкода $n_2(t)$, імпульсна перешкода $u_3(t)$ та шумові перешкоди $u_4(t)$, $u_5(t)$. Співвідношення сигнал-перешкода SJR при цьому дорівнювали відповідно: $SJR_1=SJR_2=-30$ дБ;

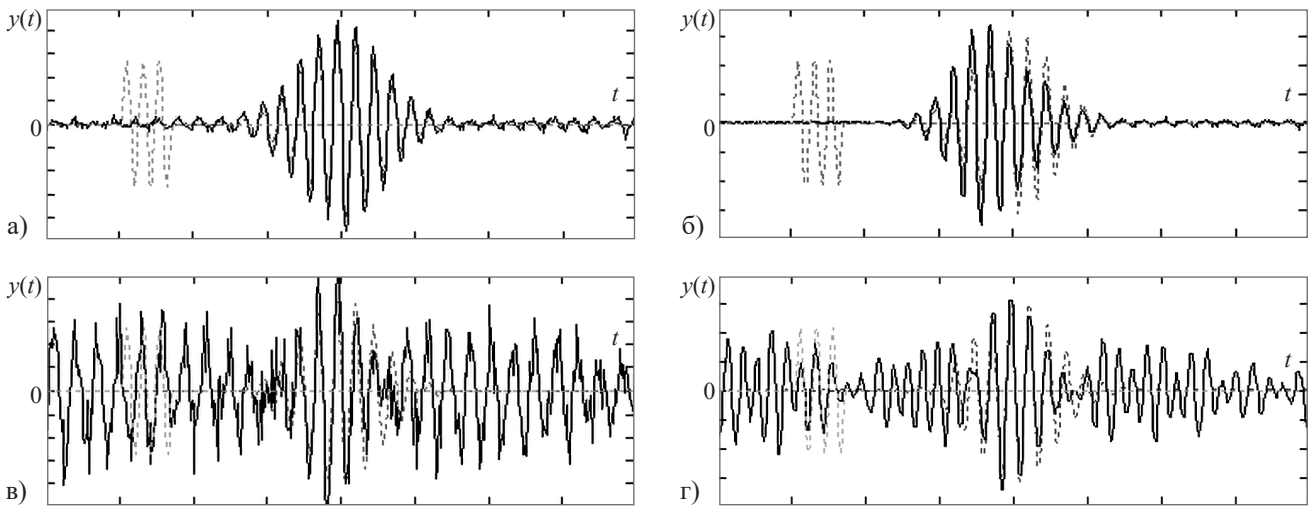
$SJR_4=SJR_5=-30$ дБ; $SJR_3=-10$ дБ. Співвідношення сигнал-шум SNR складало величину 40 дБ.

Порівняння рис. 8 а,б з рис. 8 в,г дозволяє зробити висновки, що додатковий вплив амплітудно-модульованої $n_1(t)$ та частотно-модульованої перешкоди $n_2(t)$ суттєво погіршують ефективність просторової фільтрації сигналів у лінійних антенних решітках, у яких реалізуються методи компенсації перешкод (13) і логічної обробки сигналів (16). В той же час додатковий вплив амплітудно-модульованої та частотно-модульованої перешкод жодним чином не позначається на двох інших методах: максимальної правдоподібності на основі безпосередньої інверсії кореляційної матриці (5) та рекурентного формування оцінки кореляційної матриці (12).

Значення коефіцієнтів кореляції $r[y(t), s(t)]$ між корисним сигналом $s(t)$ і сигналом на виході антенної решітки $y(t)$, а також значення коефіцієнтів подавлення перешкод на виході антенної решітки для різних умов впливу перешкод наведені у табл. 1. Коефіцієнт подавлення визначається як співвідношення $K_y = 10 \lg(D_n / D[y(t) - s(t)])$,



Р и с . 7. Сигнали на виходах планарних антенних решіток з 29 x 35 елементами, в яких реалізуються методи: а) максимальної правдоподібності на основі безпосередньої інверсії кореляційної матриці (5); б) рекурентного формування оцінки кореляційної матриці (12); в) компенсації перешкод (13); г) логічної обробки сигналів (16)



Р и с . 8. Сигнали на виходах планарних антенних решіток з 29 x 35 елементами, в яких реалізуються методи: а) максимальної правдоподібності на основі безпосередньої інверсії кореляційної матриці (5); б) рекурентного формування оцінки кореляційної матриці (12); в) компенсації перешкод (13); г) логічної обробки сигналів (16)

де D_n – сумарна дисперсія результуючої перешкоди,

$$D_n = \sum_{k=1}^K D_k, D_k$$
 дисперсія k -ї перешкоди; $D[y(t) - s(t)]$ – дисперсія шумової складової процесу $y(t)$ на виході антенної решітки.

Як можна бачити з табл. 1, найбільш ефективними методами просторової фільтрації сигналів, за допомогою яких забезпечується перешкодозахищеність, є методи максимальної правдоподібності на основі прямої інверсії кореляційної матриці та рекурентного формування оцінки кореляційної матриці. Дещо гіршими є методи логічної обробки сигналів та компенсації перешкод, при цьому останній є найгіршим з даного переліку методів. Критерієм, що визначає спроможність РЛС виконувати свої функції за призначенням в умовах впливу пере-

шкод, є забезпечення значення коефіцієнту кореляції $r[y(t), s(t)]$ між корисним сигналом $s(t)$ і сигналом на виході антенної решітки $y(t)$ при вирішенні задачі просторової фільтрації не менше 0,5:

$$r[y(t), s(t)] \geq 0,5. \quad (13)$$

Важливою характеристикою алгоритмів обробки сигналів є їх обчислювальна складність. Виходячи з аналізу алгоритмів просторової фільтрації (5)...(9); (10)...(12); (13)...(15); (16), (17) для чотирьох розглянутих методів відповідно, порядок їх обчислювальної складності в залежності від кількості елементів антенної решітки K і кількості часових відліків сигналів I , які використовуються в ході їх обробки, буде визначатись виразами, які наведені у табл. 2, при цьому враховувалась лише кількість операцій комплексного множення.

Т а б л и ц я 1. Значення коефіцієнтів кореляції та коефіцієнтів подавлення перешкод на виході антенної решітки для різних умов впливу перешкод

коefficient кореляції/коefficient подавлення, дБ	Суміш перешкод на вході/ співвідношення сигнал-перешкода		
	$n_1(t), n_2(t), n_3(t), n_4(t), u_5(t)$		
метод	0.1/ 0.1/ 0.1/ 10^{-3} / 10^{-3}	0.1/ 0.1/ 0.1/ 10^{-4} / 10^{-4}	10^{-3} / 10^{-3} / 0.1/ 10^{-3} / 10^{-3}
максимальної правдоподібності	0.993/ 70.6	0.99/ 76.4	0.993/ 73.2
рекурентного формування оцінки кореляційної матриці	0.913/ 59.7	0.914/ 70.1	0.914/ 62.3
компенсації перешкод	0.87/ 57	0.615/ 56.5	0.49/ 57.4
логічної обробки сигналів	0.915/ 57	0.64/ 57	0.53/ 57.7

Т а б л и ц я 2. Порядок обчислювальної складності реалізації розглянутих методів просторової фільтрації сигналів

метод	порядок обчислювальної складності
максимальної правдоподібності	$O\left[K^3 + \frac{K(K+1)I}{2} + K^2I + K(I+1)\right]$
рекурентного формування оцінки кореляційної матриці	$O\left[(3K^2 + K)I\right]$
компенсації перешкод	$O\left[K_{aux}^3 + \frac{K_{aux}(K_{aux}+1)I}{2} + K_{aux}^2 + 3K_{aux}I + K \cdot I\right]$
логічної обробки сигналів	$O\left[K \cdot I + (K_{aux} + 3)I\right]$

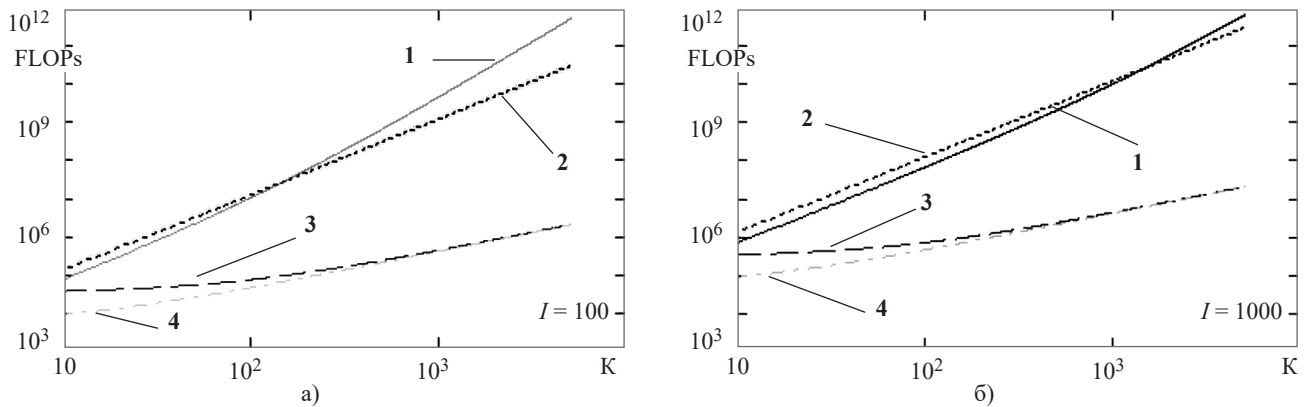


Рис. 9. Продуктивності системи обробки сигналів (у FLOPs), необхідні для реалізації зазначених методів: а) для $I = 100$; б) для $I = 1000$. Методи: 1 – максимальної правдоподібності; 2 – рекурентного формування оцінки кореляційної матриці; 3 – компенсації перешкод; 4 – логічної обробки сигналів

На основі співвідношень, які визначають обчислювальну складність методів, зведених у табл. 2, можна оцінити мінімальні вимоги щодо продуктивності системи обробки сигналів, необхідні для реалізації зазначених методів, враховуючі при цьому, що виконання однієї операції комплексного множення потребує виконання чотирьох операцій множення з дійсними числами. Результати оцінки продуктивності системи обробки сигналів (у FLOPs – floating-point operations per second), необхідні для реалізації зазначених методів як залежності від кількості елементів антенної решітки K , наведені на рис. 9а,б. Кількість допоміжних каналів прийому решітки K_{aux} , які використовувались при реалізації методів компенсації перешкод і логічної обробки сигналів, дорівнювала 9: $K_{aux} = 9$. Кількість часових відліків сигналів, які використовувались при обробці, дорівнювала 100 (рис. 9а) і 1000 (рис. 9б).

Як можна бачити з рис. 8, продуктивність системи обробки сигналів при реалізації методів максимальної правдоподібності та рекурентного формування оцінки кореляційної матриці в антенних решітках з великою кількістю елементів (більше 1000) повинна сягати десятків GFLOPs та вище. В той же час, реалізація методів компенсації перешкод і логічної обробки сигналів в антенних решітках з великою кількістю елементів (більше 1000) потребує на декілька порядків менші обчислювальні ресурси системи обробки сигналів.

ВИСНОВКИ

1. Найбільш ефективними методами просторової фільтрації сигналів в РЛС є методи максимальної правдоподібності та рекурентного формування оцінки кореляційної матриці, які дозволяють забезпечити надійний радіоелектронний захист РЛС при її функціонуванні в умовах впливу значної кількості спеціально організованих перешкод і ненавмисних завад. Недоліком методів є потреба у значних обчислювальних ресурсах системи обробки сигналів.

2. Менш ефективними методами просторової фільтрації сигналів в РЛС є методи компенсації перешкод і логічної обробки сигналів, але для їх реалізації потреба у обчислювальних ресурсах системи обробки сигналів є меншою на декілька порядків. У порівнянні з методом компенсації перешкод, метод логічної обробки сигналів

є інваріантним стосовно кількості джерел перешкод. При реалізації методу компенсації перешкод максимально можлива кількість джерел перешкод $N_{jam,max}$ обмежується кількістю допоміжних каналів прийому решітки K_{aux} : $N_{jam,max} \leq K_{aux} - 1$. Крім того, алгоритми, засновані на методі логічної обробки сигналів у антенних решітках, характеризуються інваріантністю по відношенню до умов непараметричної апріорної невизначеності, а ефективність обробки не залежить від виду розподілу перешкод. Також, перевагою методу є відсутність необхідності адаптації до умов приймання сигналів.

3. Ефективність обробки сигналів в антенних решітках з використанням методу логічної обробки сигналів може бути не гірше, а в умовах реального приймання може бути навіть краще, ніж ефективність, забезпечувана за рахунок використання традиційних методів обробки.

4. Отримані моделі функціонування РЛС з планарною антенною решіткою в умовах радіоелектронного подавлення дозволяють: здійснювати симуляцію роботи РЛС, що досліджується, на ЕОМ; оцінювати ефективність захисту РЛС від впливу перешкод; контролювати сигнально-енергетичні співвідношення між корисними сигналами та перешкодами; обґрунтовувати основні вимоги до РЛС з питань радіоелектронного захисту; обирати оптимальні види перешкод для здійснення радіоелектронного подавлення сучасних РЛС.

5. Отримані моделі функціонування РЛС в умовах радіоелектронного подавлення є основою для обґрунтування основних вимог до авіаційних засобів РЕБ.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Buckley, K.M. (1987). Spatial / spectral filtering with linearly-constrained minimum variance beamformers. IEEE Trans. on ASSP. ASSP-35. Pp. 249 — 266. DOI: 10.1109/TASSP.1987.1165142.
2. Frost, O.L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing, Proc. IEEE. # 60. Pp. 926—935.
3. Van Veen, B. & Buckley, K. (1988). Beamforming: a versatile approach to spatial filtering. IEEE ASSP Magazine. # 5 (2). Pp. 4—24. DOI: 10.1109/53.665.
4. Haykin, S. (1991). Advances in Spectrum Analysis and Array Processing. Vol. 1 and 2. Englewood Cliffs. NJ. Prentice Hall.

5. Johnson, D.H. & Dudgeon, D.E. (1992). *Array Signal Processing: Concepts and Methods*. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
6. Haykin, S. (1995). *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*. Vol. 3. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
7. Buckley, K.M., Douglass, S.C., Sayed, A.H., Van Veen, B., et al. (1999). *Digital Signal Processing Handbook*. Ed. by V.K. Madisetti and D.B. Williams. CRC Press. 1690 p.
8. Monzingo, R.A., Miller, T.W. & Haupt, R.L. (2011). *Introduction to Adaptive Arrays*. SciTech Publishing. 686 p.
9. Grundinger, A. (2020). *Statistical Robust Beamforming for Broadcast Channels and Applications in Satellite Communication*. Springer. 261 p.
10. Bryn, F. (1962). Optimum Signal Processing of Three-Dimensional Arrays Operating on Gaussian Signals and Noise. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 34. No. 3. Pp. 289—297. <https://doi.org/10.1121/1.1928112>.
11. Barton, D.K. (2005). *Radar System Analysis and Modeling*. Artech House. 564 p.
12. Budge, M.C. & German, S.R. (2015). *Basic Radar Analysis*. Artech House. 728 p.
13. Meikle, H. (2008). *Modern Radar Systems*. Artech House. 724 p.
14. *Novel Radar Techniques and Applications*. (Klemm R., Nickel U., Gierull C., et al. – Eds.). Vol. 1, 2. SciTech Publishing. 2017. 952 p. 554 p.
15. Melvin, W.L. & Scheer, J.A. (2013). *Principles of Modern Radar*. Vol. 2. Advanced Techniques. SciTech Publishing. 876 p.
16. *Radar Handbook*. (Skolnik M.L. – Edr.). McGraw-Hill. 2008. 1352 p.
17. Tuzlukov, V. (2013). *Signal Processing in Radar Systems*. CRC Press. 625 p.
18. Свид І.В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору. Дніпро: Ліра ЛТД. 2022. 224 с.
19. Рябуха В.П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 1. Корреляционные автокомпенсаторы на основе стохастических градиентных алгоритмов адаптации. *Прикладная радиоэлектроника*. 2016. Т. 15. № 1. С. 11—25.
20. Рябуха В.П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 2. Квазинытоновские корреляционные автокомпенсаторы. Адаптивные решетчатые фильтры. *Прикладная радиоэлектроника*. 2016. Т. 15. № 2. С. 88—99.
21. Рябуха В.П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 3. Математическая модель системы пространственной обработки сигналов в РЛС с двухмерной плоской ФАР. *Прикладная радиоэлектроника*. 2016. Т. 15. № 4. С. 301—315.
22. Мезенцев О.В., Шовкошитний І.І., Капась М.А. Спосіб підвищення швидкодії адаптивних систем обробки сигналів радіолокаційних головок самонаведення літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. № 1(49). С. 105—110.
23. Popoff, A.A. (2022). *Fundamentals of Signal Processing in Generalized Metric Spaces: Algorithms and Applications*. CRC Press. 450 p.
24. Теоретические основы моделирования и оценки эффективности систем вооружения; под ред. Г.И. Андреева. Тверь: ВУ ПВО. 2000. 380 с.
25. Надежность и эффективность в технике: в 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем; под ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение. 1988. 328 с.
26. Чумаков Н.М., Серебряный Е.И. Оценка эффективности сложных технических устройств. М.: Сов. Радио. 1980. 192 с.
27. Metropolis, N. & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo method. *J. of American Statistical Association*. Vol. 44. # 247. Pp. 335—341.
28. Fishman, G.S. (1996). *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer.
29. Метод статистических испытаний / Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А., Страгович В.Г., Соболев И.М., Голенко Д.И. М.: Физматлит. 1962.
30. Leonov, S.A. (2001). *Handbook of Computer Simulation in Radio Engineering, Communications, and Radar*. Artech House.
31. Welch, M. & Pywell, M. (2012). *Electronic Warfare Test and Evaluation*. NATO Research and Technology Organization. 314 p.
32. Adamy, D.L. (2006). *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation: Radar, Sonar and Navigation*. Scitech Publishing. 242 p.
33. Park, S.R., Nam, I. & Noh, S. Modeling and simulation for investigation of radar responses to electronic attacks in Electronic Warfare environments. *Hindawi Security and Communications Networks*.
34. *Modern Antenna Handbook*. Edited by C.A. Balanis. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ. 2008. 1700 p. <https://doi.org/10.1002/9780470294154>.
35. *Antenna Engineering Handbook*. Ed. by R.C. Johnson. McGraw-Hill. 1993. 1512 p.
36. Tabcart, J.M., Dance, S.L., Lawless, A.S., Nichols, N.K. & Waller, J.A. (2020). Improving the condition number of estimated covariance matrices. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. Vol. 72 (1). Pp. 1—19.
37. Golub, G.H. & Van Loan, C.F. (2013). *Matrix Computations*. JHU Press. 756 p.
38. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 1986.
39. Попов, А.О., Твердохлібов, В.В., Білобородова, Л.В. (2025). Аналіз можливостей використання планарних антенних решіток у перспективних зразках техніки радіоелектронної боротьби з бортовими радіолокаційними системами засобів повітряного нападу. Озброєння та військова техніка, 45(1), 75–83. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.1\(45\).75-83](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.1(45).75-83)

REFERENCES

1. Buckley, K.M. (1987). Spatial / spectral filtering with linearly-constrained minimum variance beamformers. *IEEE Trans. on ASSP*. ASSP-35. Pp. 249 — 266. DOI: 10.1109/TASSP.1987.1165142.
2. Frost, O.L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing, *Proc. IEEE*. # 60. Pp. 926—935.
3. Van Veen, B. & Buckley, K. (1988). Beamforming: a versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*. # 5 (2). Pp. 4—24. DOI: 10.1109/53.665.
4. Haykin, S. (1991). *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*. Vol. 1 and 2. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
5. Johnson, D.H. & Dudgeon, D.E. (1992). *Array Signal Processing: Concepts and Methods*. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.

6. Haykin, S. (1995). *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*. Vol. 3. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
7. Buckley, K.M., Douglass, S.C., Sayed, A.H., Van Veen, B., et al. (1999). *Digital Signal Processing Handbook*. Ed. by V.K. Madisetti and D.B. Williams. CRC Press. 1690 p.
8. Monzingo, R.A., Miller, T.W. & Haupt, R.L. (2011). *Introduction to Adaptive Arrays*. SciTech Publishing. 686 p.
9. Grundinger, A. (2020). *Statistical Robust Beamforming for Broadcast Channels and Applications in Satellite Communication*. Springer. 261 p.
10. Bryn, F. (1962). Optimum Signal Processing of Three-Dimensional Arrays Operating on Gaussian Signals and Noise. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 34. No. 3. Pp. 289—297. <https://doi.org/10.1121/1.1928112>.
11. Barton, D.K. (2005). *Radar System Analysis and Modeling*. Artech House. 564 p.
12. Budge, M.C. & German, S.R. (2015). *Basic Radar Analysis*. Artech House. 728 p.
13. Meikle, H. (2008). *Modern Radar Systems*. Artech House. 724 p.
14. *Novel Radar Techniques and Applications*. (Klemm R., Nickel U., Gierull C., et al. – Eds.). Vol. 1, 2. SciTech Publishing. 2017. 952 p. 554 p.
15. Melvin, W.L. & Scheer, J.A. (2013). *Principles of Modern Radar*. Vol. 2. *Advanced Techniques*. SciTech Publishing. 876 p.
16. *Radar Handbook*. (Skolnik M.L. – Edr.). McGraw-Hill. 2008. 1352 p.
17. Tuzlukov, V. (2013). *Signal Processing in Radar Systems*. CRC Press. 625 p.
18. Svyd, I.V. (2022) “Obrobka radiolokatsiinoi informatsii system sposterezhenia povitrianoho prostoru” [Processing of radar information from wind warning systems]. Dnipro: Lira LTD. 224 p.
19. Riabukha, V.P. (2016) “Adaptivnye systemy zashity RLS ot shumovyh pomekh. 1. Korreliatsionnye avtokompensatory na osnovе stohasticheskikh gradientnykh algoritmov adaptatsii” [Adaptive radar noise jamming protection systems. 1. Correlation self-compensators based on stochastic gradient algorithms of adaptation. *Applied Radio Electronics: Sci. J.* Vol. 15. № 1. Pp. 11—25.
20. Riabukha, V.P. (2016) “Adaptivnye systemy zashity RLS ot shumovyh pomekh. 2. Kvaziniutonovskie korreliatsionnye avtokompensatory. Adaptivnye reshchatye filtry” [Adaptive radar noise jamming protection systems. 2. Quasi-Newton correlation self-compensators. Adaptive lattice filters]. *Applied Radio Electronics: Sci. J.* Vol. 15. № 2. Pp. 88 —99.
21. Riabukha, V.P. (2016) “Adaptivni systemy zakhystu RLS vid shumovykh zavod. 3. Matematychna model systemy prostoroivoi obrobky syhnaliv u RLS z dvovymirnoiu ploskoiu FAR” [Adaptive radar noise jamming protection systems. 3. Mathematical model of the system of spatial signal processing in a radar with a rectangular planar PAA]. *Applied Radio Electronics: Sci. J.* Vol. 15. № 4. Pp. 301—315.
22. Mezencev, O.V., Shovkoshitnij, I.I. & Kapas M.A. (2024) “Sposib pidvyshchennia shvydkodii adaptivnykh system obrobky syhnaliv radiolokatsiinykh holovok samonavedennia litalnykh aparativ” [Method for advancing the speed code of adaptive signal processing systems of radar homing heads of lethal vehicles]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. Vol. 49. №. 1. Pp. 105—110.
23. Popoff, A.A. (2022). *Fundamentals of Signal Processing in Generalized Metric Spaces: Algorithms and Applications*. CRC Press. 450 p.
24. Andreev, G.I. (2000) “Teoreticheskie osnovy modelirovaniia i otsenki effektivnosti system vooruzheniia” [Theoretical foundations of modeling and evaluation of the effectiveness of weapons systems]. Tver: Military Academy of Aerospace Defense. 380 p.
25. Avduevsky, V.S. and others. (1988). “Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik v 10 t.” [Reliability and efficiency in engineering]. T. 3: *Effektivnost tekhnicheskikh system* [Vol. 3: The effectiveness of technical systems]. Eds.: Utkin V.F., Kryuchkov Yu.V. M.: Mechanical engineering. 328 p.
26. Chumakov, N.M. & Serebryanyj, E.I. (1980) “Otsenka effektivnosti slozhnykh tekhnicheskikh ustroystv” [Evaluation of the effectiveness of complex technical devices]. M.: Sov. Radio. 192 p.
27. Metropolis, N. & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo method. *J. of American Statistical Association*. Vol. 44. # 247. Pp. 335—341.
28. Fishman, G.S. (1996). *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer.
29. Buslenko, N.P., Shrejder, Yu.A., Stragovich, V.G., Sobol, I.M. & Golenko, D.I. (1962) “Metod statisticheskikh ispytaniy” [Method of statistical tests]. M.: Publishing house of physical, mathematical and technical literature.
30. Leonov, S.A. (2001). *Handbook of Computer Simulation in Radio Engineering, Communications, and Radar*. Artech House.
31. Welch, M. & Pywell, M. (2012). *Electronic Warfare Test and Evaluation*. NATO Research and Technology Organization. 314 p.
32. Adamy, D.L. (2006). *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation: Radar, Sonar and Navigation*. Scitech Publishing. 242 p.
33. Park, S.R., Nam, I. & Noh, S. Modeling and simulation for investigation of radar responses to electronic attacks in Electronic Warfare environments. *Hindawi Security and Communications Networks*.
34. *Modern Antenna Handbook*. Edited by C.A. Balanis. John Wiley & Sons. Hoboken. NJ. 2008. 1700 p. <https://doi.org/10.1002/9780470294154>.
35. *Antenna Engineering Handbook*. Ed. by R.C. Johnson. McGraw-Hill. 1993. 1512 p.
36. Tabcart, J.M., Dance, S.L., Lawless, A.S., Nichols, N.K. & Waller, J.A. (2020). Improving the condition number of estimated covariance matrices. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. Vol. 72 (1). Pp. 1—19.
37. Golub, G.H. & Van Loan, C.F. (2013). *Matrix Computations*. JHU Press. 756 p.
38. Tihonov, A.N. & Arsenin, V.Ya. (1986) “Metody resheniia nekorrektnykh zadach” [Methods for solving ill-posed problems]. M.: Nauka. 756 p.
39. Popov, A.A., Tverdokhlibov, V.V., & Biloborodova, L.V. (2025) “Analiz mozhlyvostei vykorystznnia u perspektivnykh zrazkakh tekhniki radioelektronnoi borotby z bortovymi radiolokatsiinyymi systemamy zasobiv povitrianoogo napadu” [Analyzing planar antenna arrays for perspective automated electronic warfare stations operating against on-board radar systems of air assault means]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. K.: CSRI AME

AFU. No 1(45). Pp. 75–83. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.1\(45\).75-83](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.1(45).75-83).

Tverdokhlibov V.V., Popov A.O., Zibin S.D., Biloborodova L.V.

COMPARATIVE ANALYZING THE EFFICIENCY OF FOUR METHODS OF SPATIAL SIGNAL FILTERING AMID JAM CONDITIONS IN RADAR SYSTEM WITH PLANAR ANTENNA ARRAY

We investigate the solution of spatial signal filtering problem under jam conditions in antenna array with digital signal processing, so that as the spatial filtering methods we use maximum likelihood method; recursive matrix inversion method; side-lobe cancellation method; logic signal processing method. It is underlined that algorithms of realizing aforementioned radar electronic counter-countermeasures methods create the basis for developing active models of state-of-the art ground-based radar systems functioning. The developed models are exploited for experimental research of comparative analyzing the efficiency of four chosen methods of radar electronic counter-countermeasures, so that the severe jam influence upon radar system with planar antenna array is investigated by Monte-Carlo method realized on the basis of special software. The developed models allow substantiating main technical requirements for planar antenna arrays with digital signal processing of perspective radar systems operating amid influence of on-board electronic warfare means of UAVs and/ or aircrafts. We develop the field pattern model of planar antenna array with rectangular element arrangement allowing us investigate both beamforming process and side-lobe levels. As a criterion of spatial filtering efficiency we introduce correlation coefficient between the received signal and the signal in the output of antenna array obtained after spatial filtering which value must increase 0.5. We analyze the computational complexity of four aforementioned methods of spatial filtering and estimate computational capacity of signal processing system in floating-point operations per second that is necessary to realize these four methods. We conclude that the most efficient methods of spatial filtering are both maximum likelihood and recursive matrix inversion methods however they require the higher computational capacity of signal processing system.

Keywords: radar system, electronic countermeasures, radar electronic counter-countermeasures, spatial filtering, planar antenna array, maximum likelihood method, recursive matrix inversion method, side-lobe cancellation method, logic signal processing method, signal processing algorithm, jam.

Відомості про авторів:

Твердохлібов Володимир Віталійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України

м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Попов Андрій Олексійович

кандидат технічних наук, доцент
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Зібін Сергій Данилович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Білобородова Любов Володимирівна

ад'юнк
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0335-240X>

Information about the authors:

Tverdokhlibov Vladimir

Candidate of Science (Tech)
Senior Researcher
Chief of Scientific Research Management
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Popov Andrey

Candidate of Science (Tech)
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Zibin Sergey

Candidate of Science (Tech)
Senior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Biloborodova Lubov

PhD Candidate
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0335-240X>

Стаття прийнята до редколегії 08.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 620.186:623.746-519 (55)

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).44-52](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).44-52)

В. Л. БОГДАНОВ, академік НАН України
доктор фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

О. Я. ГРИГОРЕНКО, академік НАН України
доктор фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0002-4W9-2672>
(Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка
НАН України, м. Київ)

І. Б. ЧЕПКОВ, член-кореспондент НАН України
доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>

І. В. ОДНОРАЛОВ, доктор технічних наук
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>

А. В. КУЧИНСЬКИЙ, кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, м. Київ)

В. В. КРЕМЕНИЦЬКИЙ, кандидат
фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>

С. О. СПЕРКАЧ, кандидат
фізико-математичних наук
<https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>
(Технічний центр НАН України, м. Київ)

РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКАНУЮЧОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ МЕТАЛЕВИХ ФРАГМЕНТІВ ГІПЕРЗВУКОВИХ АЕРОБАЛІСТИЧНИХ РАКЕТ Х-47М2 «КИНЖАЛ»

У статті наведено результати застосування методу скануючої електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу для дослідження металевих фрагментів гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал». Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формування достовірної інформаційної бази щодо матеріалів, використаних у конструкціях сучасних засобів повітряного нападу агресора, з метою їх технічної ідентифікації, аналізу конструктивно-технологічних рішень та розроблення підходів до виявлення і протидії. За результатами

дослідження фрагментів корпусу, хвостової частини корпусу, внутрішньої та силової конструкцій, аеродинамічного руля і заглушки корпусу встановлено, що у конструкції застосовано алюмінієві сплави, низьколеговані та високолеговані жароміцні сталі, а також нікелеві жаростійкі сплави. Отримані результати можуть бути використані при створенні систем ідентифікації фрагментів ракетного озброєння, формуванні баз даних матеріальних ознак та під час аналізу рівня технологічних рішень, застосованих у засобах ураження ворога.

Ключові слова: скануюча електронна мікроскопія, рентгенівський мікроаналіз, металеві фрагменти, гіперзвукова аеробалістична ракета, матеріалознавча ідентифікація, жароміцні сталі, алюмінієві сплави, нікелеві сплави.

ВСТУП

У сучасних умовах збройного протиборства особливого значення набувають дослідження конструкційних матеріалів, застосованих у засобах повітряного нападу, зокрема у ракетах оперативного-тактичного та аеробалістичного класу. Розвиток високошвидкісних і гіперзвукових засобів ураження супроводжується ускладненням їх конструкції, підвищенням вимог до міцності, теплостійкості, корозійної стійкості та питомої міцності матеріалів. У зв'язку з цим встановлення хімічного складу та імовірних марок матеріалів конструктивних елементів ракет агресора є важливим завданням не лише з матеріалознавчого, а і з прикладного військово-технічного погляду.

Металеві матеріали продовжують залишатися однією з найважливіших складових конструкцій спеціального призначення попри активне впровадження композиційних матеріалів. Саме вони забезпечують несучу здатність, жароміцність, технологічність виготовлення, працездатність при високих температурах і в умовах інтенсивних механічних навантажень. У ракетній та авіаційній техніці до найбільш поширених класів матеріалів належать високоміцні алюмінієві сплави, титанові сплави, низьколеговані та високолеговані жароміцні сталі, а також нікелеві жаростійкі сплави і окремі тугоплавкі метали та сплави на їх основі. Їх застосування визначається функціональним призначенням вузла, рівнем теплового впливу, видом навантаження та вимогами до масової ефективності конструкції.

Ракета Х-47М2 «Кинжал» (9-А-7660) є складовою авіаційного комплексу «Кинжал» і розглядається як глибоко модернізована версія ракети 9М723Ф комплексу «Искандер-М». При цьому, основні конструктивні зміни були зосереджені у головній частині та в елементах, пов'язаних з авіаційним способом пуску, тоді як частина ракетних вузлів зберегла високий ступінь уніфікації з базовим виробом. Це дозволяє припустити спадкоємність низки матеріалознавчих рішень, водночас адаптованих до аеробалістичного профілю застосування, значних теплових потоків і змінених умов експлуатації [1, 2].

З огляду на зазначене, особливу науково-практичну цінність має застосування методів скануючої електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу до ре-

альних металевих фрагментів ракети Х-47М2 «Кинжал». Такі дослідження дають змогу не лише визначити елементний склад окремих зразків, а і співвіднести його з відомими марками матеріалів, зробити висновки щодо функціонального призначення елементів конструкції, технологічних підходів до їх виготовлення та особливостей матеріального забезпечення виробництва.

Метою статті є узагальнення результатів застосування методу скануючої електронної мікроскопії при дослідженні металевих фрагментів гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал», встановлення хімічного складу матеріалів окремих елементів конструкції та визначення імовірних марок сплавів і сталей, використаних при її виготовленні.

Російський авіаційний комплекс «Кинжал» 9-А-7760 прийнятий на озброєння у грудні 2017 року. До складу комплексу входять:

- авіаційний носій МиГ-31К (несе 1 ракету);
- ракета «Кинжал» 9-С-7760;
- комплект аеродромного обладнання для підготовки ракет 9-С-7760.

Цілями для ураження є наземні контрастні цілі та надводні кораблі типу авіаносець, крейсер, есмінець, фрегат. Ракета має статус гіперзвукової ракети, при цьому ракета вважається гіперзвуковою, якщо її швидкість перевищує 5 М.

В якості носія ракети 9-С-7760 використано літак-перехоплювач МиГ-31БМ, який був модернізований до версії МиГ-31К з можливістю нести одну ракету. Варто відзначити, що після модернізації МиГ-31БМ позбавлений можливості нести інше штатне озброєння (рис. 1).



Рис. 1. Ракета 9-С-7760 на підвісці МиГ-31К

Ракета 9-С-7760 є глибокою модернізацією ракети 9М723Ф «Іскандер-М». Основна модернізація була проведена в частині розробки нової головної частини з використанням наявних розробок по ракеті 9М723Ф та зменшення донного опору при знаходженні під крилом літака [3]. Для зменшення донного опору було встановлено захисний обтічник двигуна, який після скидання ракети з літака відстрілюється, після чого виконується запуск двигуна (рис. 2).

Приладовий відсік обох ракет має близькі габарити, що свідчить про високу ступінь уніфікації відсіків. Відсік бойової частини був замінений на новий у зв'язку із застосуванням нової бойової частини проникаючої дії замість відсіку бойової частини з фугасною бойовою частиною, який в свою чергу був уніфікований з касетною бойовою частиною.

Схему польоту можливо розділити на декілька основних етапів, а саме:

- скидання ракети з літака;
- відділення захисного обтічника двигуна;
- набір висоти та маневрування;
- пікування та наведення на ціль.

Основні тактико-технічні характеристики гіперзвукової аеробалістичної ракети Х-47М2 «Кинжал»:

- тип траєкторії – аеробалістична;
- максимальна дальність ураження (з урахуванням польоту носія) – до 3000 км;
- дальність польоту ракети – до 1000 км;
- максимальна швидкість на висоті 20 км – до 12 М (14688 км/ч);
- точність (КІВ) – до 1 м;
- тип бойової частини – проникаюча або ядерна;
- наведення – ІНС з ГЛОНАСС, активна радіолокаційна ГСН;
- маса ракети – не менше 4000 кг;
- маса бойової частини ~500 кг;
- довжина ракети – 7700 мм;
- діаметр корпусу – 920 мм.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для виконання досліджень використовувалися металеві фрагменти ракети Х-47М2 «Кинжал», які належали до різних конструктивних елементів – фрагмент корпусу, фрагмент хвостової частини корпусу, фрагмент внутрішньої конструкції, фрагмент силової конструкції, фрагмент аеродинамічного руля, заглушка корпусу. Та-



Рис. 2. Відстріл захисного обтічника двигуна та запуск двигуна

кий підхід надавав можливість простежити відмінності у виборі матеріалів залежно від функціонального призначення конкретного вузла.

Дослідження проводилися із застосуванням методу скануючої електронної мікроскопії у поєднанні з рентгенівським мікроаналізом. Це дозволило отримати як морфологічні ознаки поверхні та мікроструктурні особливості зразків, так і кількісні оцінки елементного складу у локальних ділянках матеріалу. Для окремих фрагментів аналіз проводився як по основному масиву матеріалу, так і по включеннях або окремих фазах, виявлених у зображеннях у відображених електронах. Поєднання морфологічного та елементного аналізу є важливим для коректної інтерпретації складу багатоконпонентних сплавів [4–6].

Ідентифікація матеріалів здійснювалася шляхом зіставлення отриманого елементного складу з відомими довідковими характеристиками сучасних конструкційних металів і сплавів, що застосовуються агресором при створенні засобів ураження. При цьому враховувалися не лише масові частки елементів, а і типовий функціональний контекст застосування матеріалу – температура експлуатації, корозійна стійкість, технологічність, рівень механічних навантажень, потреба у високій питомій міцності чи жаротривкості. Саме тому результати мікроаналізу розглядалися у нерозривному зв'язку з конструктивним призначенням елемента ракети, що досліджується [7].

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сучасне ракето- та авіабудування базується на використанні широкого спектра металевих матеріалів, кожен з яких займає власну функціональну нішу. Високоміцні алюмінієві сплави застосовуються там, де пріоритетними є мала густина, корозійна стійкість і достатня механічна міцність. Вони широко використовуються для елементів обшивки, корпусних оболонок і деталей, що працюють при помірних температурах. Одночасно їх застосування обмежується зниженням міцності за високих температур, що виключає використання таких сплавів у найбільш теплонавантажених елементах.

Жароміцні та корозійностійкі сталі є основою для деталей, що працюють при підвищених температурах та значних силових навантаженнях. За рахунок легування

хромом, нікелем, марганцем, молібденом, кремнієм та іншими елементами досягається підвищення жаростійкості, окислювості, зварюваності та довговічності. Саме тому ці матеріали широко застосовуються у силових вузлах, відсіках, газопровідних системах, деталях камер згоряння та інших елементах, які піддаються термічному та механічному впливу.

Окрему групу становлять нікелеві жаростійкі сплави, що використовуються в умовах інтенсивного теплового впливу та обмеженого терміну служби за високих температур. Такі сплави з високим вмістом нікелю, хрому, молібдену, вольфраму та інших елементів є характерними для вузлів, які мають забезпечувати збереження форми, міцності та хімічної стійкості в умовах інтенсивного аеродинамічного нагрівання або дії високотемпературних газових потоків.

Таким чином, матеріальна структура ракети, як засобу ураження, не може бути однорідною. Вона формується як функціонально диференційована система, в якій вибір матеріалу визначається поєднанням вимог до міцності, маси, температурної стійкості, корозійної стійкості, технологічності та економічної доцільності. Саме це положення стало методологічною основою інтерпретації результатів дослідження фрагментів ракети X-47M2 «Кинжал».

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ФРАГМЕНТІВ РАКЕТИ X-47M2 «КИНЖАЛ» (9-A-7660)

Фрагмент корпусу ракети

За результатами рентгенівського мікроаналізу основний масив матеріалу фрагмента корпусу характеризується переважним вмістом алюмінію та магнію (рис. 3). Таке співвідношення елементів дало підстави віднести матеріал до алюмінієвих сплавів типу АМг6. Для цього сплаву характерними є низька густина, достатньо висока міцність, стійкість до корозії та високі експлуатаційні характеристики в умовах вібраційних навантажень. У контексті конструкції ракети це вказує на прагнення забезпечити мінімальну масу зовнішньої оболонки за умови збереження необхідної жорсткості та працездатності [8].

У мікроструктурі зразка були виявлені включення, у яких, крім основних елементів, виявлено підвищені концентрації заліза, марганцю та кремнію. Такі включення інтерпретовано як вторинні фази, характерні для сплавів

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F								
Mg		7.745	8.5236	8.022	8.023	0.9546	0.9715	1.0426
0.9424								
Al		92.239	91.4606	99.571	188.119	0.9158	0.9640	0.9500
1.0000								
Si		0.016	0.0158	0.008	0.008	2.0550	0.9756	2.1063
1.0000								

Total		100.000	100.0000	107.601	196.149	Iteration = 5		

Рис. 3. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента заглушки корпусу ракети 9-A-7660

системи Al-Mg, зокрема інтерметаліди типу Al₆(Mn,Fe), α-Al(Fe,Mn)Si, Mg₂Si. Наявність цих фаз підтверджує багатокомпонентний характер сплаву та технологічну специфіку його виготовлення.

Отже, зовнішній корпус ракети виконано з легкого деформованого алюмінієво-магнієвого сплаву, що цілком узгоджується з сучасними підходами до проектування корпусних оболонок ракетного озброєння, де масова ефективність є одним із визначальних критеріїв.

Фрагмент хвостової частини корпусу

Результати елементного аналізу фрагмента хвостової частини корпусу показали домінування заліза за наявності хрому, нікелю, кремнію та незначних домішок вольфраму (рис. 4). За сукупністю ознак матеріал було ідентифіковано як низьколеговану сталь типу 18X3МВ. Для цієї сталі характерні достатня пластичність, жароміцність та працездатність за температур до 450–500 °С [8].

Застосування саме такого матеріалу у хвостовій частині корпусу є закономірним, оскільки цей вузол зазнає підвищеного теплового впливу, пов'язаного з роботою двигуна, газодинамічними потоками та аеродинамічним нагріванням. У порівнянні з алюмінієвими сплавами

низьколегована жароміцна сталь забезпечує кращу стабільність властивостей за високих температур і є більш придатною для елементів, які одночасно сприймають механічне та теплове навантаження.

Фрагмент внутрішньої конструкції корпусу

У складі матеріалу внутрішньої конструкції корпусу виявлено високий вміст заліза, хрому, нікелю та марганцю (рис. 5). Досліджуваний зразок не притягувався магнітом, що додатково підтверджує високу частку аустенітної складової. За результатами зіставлення з довідковими даними матеріал було віднесено до легваної жароміцної сталі типу 12Х25Н16Г7АР [8].

Зазначена сталь застосовується для виробництва листів, дроту, труб, стрічок та деталей, які працюють при температурах до +950 °С за помірного навантаження, а також для елементів турбінобудування, камер згоряння, газопровідних систем і листових деталей, що експлуатуються при високих температурах. Зазначене узгоджується з імовірним функціональним призначенням внутрішнього відсіку наведення та суміжних конструкцій ракети, де необхідна поєднана стійкість до температурного впливу та достатня конструкційна жорсткість.

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F	Fe	96.081	95.3245	95.553	95.553	1.0017	1.0002	1.0024
0.9991	C	0.194	0.8998	0.194	103.088	1.0025	0.9997	1.0029
1.0000	Cr	2.266	2.4235	2.828	2.828	0.8013	1.0019	1.0064
0.7946	W	0.428	0.1296	0.313	0.314	1.3671	1.3402	1.0201
1.0000	Si	0.238	0.4717	0.161	0.161	1.4754	0.8906	1.6567
1.0000	Ni	0.793	0.7509	0.757	0.757	1.0467	0.9842	1.0637
0.9998								

	Total	100.000	100.0000	99.807	202.701	Iteration = 3		

Рис. 4. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента хвостової частини корпусу ракети 9-А-7660

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F	Fe	52.156	51.5063	52.061	52.061	1.0112	1.0018	1.0240
0.9857	Cr	25.488	26.7831	27.663	27.663	0.9214	1.0034	1.0055
0.9132	Mn	6.764	6.7270	7.041	9.092	0.9606	0.9665	1.0042
0.9897	Si	0.466	0.9056	0.318	0.318	1.4628	0.8916	1.6408
1.0000	Ni	15.126	14.0781	14.598	14.598	1.0362	0.9860	1.0509
1.0000								

	Total	100.000	100.0000	101.681	103.732	Iteration = 4		

Рис. 5. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента внутрішньої конструкції корпусу ракети 9-А-7660

Фрагмент силової конструкції ракети

Елементний склад фрагмента силової конструкції також характеризується наявністю заліза, хрому, нікелю та марганцю у співвідношеннях, близьких до попередньо розглянутого зразка внутрішньої конструкції. Зразок не притягувався магнітом, що вказує на аустенітний або близький до нього характер мікроструктури. На підставі цього зроблено висновок, що матеріал силової конструкції або належить до сталі 12Х25Н16Г7АР, або є близьким до неї за складом високолегованим жароміцним сплавом (рис. 6).

Отриманий результат свідчить про уніфікований підхід до вибору матеріалів для внутрішніх силових і теплонавантажених вузлів ракети. Імовірно, виробник використовує групу споріднених високолегованих жароміцних сталей для елементів, які мають працювати у складних температурно-силових умовах та одночасно забезпечувати технологічність виготовлення і зварювання.

Фрагмент аеродинамічного руля

Окремий інтерес становлять результати дослідження фрагмента аеродинамічного руля ракети. У масиві матеріалу виявлено високий вміст нікелю та хрому за наявності молібдену, вольфраму, титану, алюмінію та незначної кількості заліза (рис. 7). Крім того, у наявних включеннях в основний масив металу зафіксовано різке зростання концентрації вольфраму та молібдену. За сукупністю результатів матеріал було ідентифіковано як нікелевий жаростійкий сплав типу ХН56ВМТЮ, відомий також як ЕП199.

Застосування такого сплаву в аеродинамічному рулі є цілком логічним. Цей елемент конструкції під час польоту гіперзвукової аеробалістичної ракети зазнає значного аеродинамічного нагрівання, впливу теплового потоку та механічного навантаження при маневруванні. Для таких умов необхідний матеріал, здатний зберігати міцність, форму і хімічну стійкість при температурах, близьких до 950 °С, навіть якщо йдеться про обмежений

ZAF Metal							
Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F							
Ni	15.640	14.6442	15.094	15.094	1.0362	0.9861	1.0508
1.0000							
C	0.088	0.4042	0.089	47.603	0.9868	1.0015	0.9854
1.0000							
Cr	24.599	26.0048	26.789	26.789	0.9182	1.0035	1.0056
0.9099							
Fe	54.008	53.1100	53.423	53.423	1.0100	1.0020	1.0233
0.9851							
Si	0.175	0.3433	0.120	0.120	1.4676	0.8918	1.6458
1.0000							
Mn	5.490	5.4934	5.423	5.423	1.0125	1.0214	1.0020
0.9893							

Total	100.000	100.0000	100.938	148.452	Iteration = 4		

Р и с . 6. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента силової конструкції ракети 9-А-7660

ZAF Metal							
Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F							
Ti	1.542	1.9169	1.544	1.560	0.9990	0.9977	1.0435
0.9595							
Al	2.759	5.7643	1.361	1.364	1.9196	0.9139	2.1008
0.9999							
Cr	21.102	23.9544	21.379	21.379	0.9787	0.9985	1.0218
0.9593							
Fe	1.499	1.5976	1.602	1.602	0.9353	0.9957	1.0293
0.9127							
Mo	4.118	2.5553	3.166	3.166	1.3009	1.0883	1.1962
0.9993							
Ni	61.433	61.7676	61.563	61.563	0.9895	0.9783	1.0156
0.9959							
W	7.547	2.4438	5.568	5.574	1.3555	1.3285	1.0203
1.0000							

Total	100.000	100.0000	96.183	96.207	Iteration = 4		

Р и с . 7. Результати мікроаналізу зрізу фрагменту аеродинамічного руля ракети 9-А-7660

ZAF Metal	Element	Mass (%)	Atom (%)	K (%)	K-raw (%)	ZAF	Z	A
F	Fe	52.007	50.9925	50.812	50.812	1.0110	1.0018	1.0244
0.9851	Si	0.014	0.0257	0.009	0.009	1.4654	0.8916	1.6436
1.0000	Mn	6.369	6.3478	6.215	6.215	1.0122	1.0212	1.0019
0.9893	Cr	25.774	27.1427	27.614	27.614	0.9220	1.0034	1.0054
0.9139	C	0.198	0.9049	0.200	106.500	0.9791	1.0014	0.9777
1.0000	Ni	15.638	14.5864	14.911	14.911	1.0359	0.9860	1.0507
1.0000								

	Total	100.000	100.0000	99.761	206.061	Iteration = 4		

Р и с . 8. Результати мікроаналізу зрізу фрагмента заглушки корпусу ракети 9-А-766

термін служби. Таким чином, застосування нікелевого жаростійкого сплаву в цьому вузлі є функціонально обґрунтованим.

Заклушка корпусу ракети

За результатами мікроаналізу матеріал заглушки корпусу ракети характеризується вмістом заліза, хрому, нікелю та марганцю (рис. 8). На підставі співставлення складу з довідковими даними цей матеріал віднесено до легованої жароміцної корозійностійкої сталі типу 08X16H13M2B. Ця сталь використовується для поковок дисків та роторів, лопаток, болтів та інших деталей, що тривалий час працюють при температурах до 600 °С.

Це свідчить про те, що навіть у другорядних на перший погляд елементах конструкції ракети застосовуються спеціалізовані сталі з підвищеними експлуатаційними характеристиками та про чітку орієнтацію на забезпечення працездатності конструкції у складних умовах аеробалістичного польоту.

Отримані результати дозволяють зробити важливий висновок про функціонально диференційований характер матеріалознавчої структури ракети X-47M2 «Кинжал». У зовнішніх елементах, де визначальними є вимоги до малої маси та достатньої жорсткості, застосовано алюмінієві сплави. У хвостових, силових, внутрішніх та теплонавантажених вузлах переважають жароміцні і корозійностійкі сталі. В елементах, які зазнають інтенсивного аеродинамічного нагрівання та механічного впливу, використовуються нікелеві жаростійкі сплави.

З матеріалознавчого погляду така структура відповідає загальним тенденціям сучасного ракетно- і авіабудування, викладеним у теоретичному огляді сучасних металів та сплавів. Зокрема, алюмінієві сплави використовуються для масозниження конструкцій, жароміцні сталі – для силових та високотемпературних вузлів, а нікелеві сплави для елементів, які працюють у складних теплових умовах. Відтак, результати дослідження дозволяють ідентифікувати окремі матеріали та підтверджують загальні закономірності проектування зразків ракетного озброєння агресора.

Необхідно відзначити узгодженість результатів мікроаналізу з результатами досліджень ракети 9M723Ф «Искандер-М» [7]. Наявність у конструкції високолегованої сталі типу 12X25H16Г7АР, що визначена як матеріал елементів внутрішньої конструкції та, імовірно, відсіку наведення, вказує на спадковість окремих матеріальних рішень у межах цього сімейства ракет. Одночасно виявлення поєднання легких сплавів і високолегованих жаростійких матеріалів свідчить про адаптацію конструкції до специфіки аеробалістичного способу застосування.

З прикладної точки зору, результати мають значення для формування інформаційної бази ідентифікації уламків ракетного озброєння. Встановлений хімічний склад окремих фрагментів може бути використаний як один з ідентифікаційних критеріїв поряд із геометричними ознаками, особливостями обробки поверхні, структурою покриттів та іншими характеристиками. Крім того, отримані дані дають можливість оцінювати рівень технологічної культури виробництва, характер стандартизаційної бази та можливу номенклатуру напівфабрикатів, що застосовуються при виготовленні таких виробів.

ВИСНОВКИ:

1. Застосування методу скануючої електронної мікроскопії у поєднанні з рентгенівським мікроаналізом забезпечує ефективне дослідження металевих фрагментів гіперзвукової аеробалістичної ракети X-47M2 «Кинжал» (9-А-7660) та дозволяє визначати елементний склад матеріалів окремих конструктивних елементів.

2. Встановлено, що у конструкції ракети X-47M2 «Кинжал» застосовано функціонально диференційовану систему матеріалів, яка включає легкі алюмінієві сплави, низьколеговані жароміцні сталі, високолеговані корозійностійкі жароміцні сталі та нікелеві жаростійкі сплави.

3. Отримані результати узгоджуються з загальними закономірностями добору матеріалів для зразків ракетного озброєння, згідно з якими вибір матеріалу визначається співвідношенням вимог до маси, міцності, жароміцності, корозійної стійкості та технологічності.

4. Узгодженість експериментальних результатів із конструктивними описами ракети «Кинжал» підтверджує, що досліджуваний виріб зберігає спадкоємність окремих матеріалознавчих рішень з ракетою 9М723Ф «Искандер-М», адаптованих до умов аеробалістичного застосування.

5. Результати досліджень хімічного складу металевих фрагментів конструкцій ракети Х-47М2 «Кинжал» свідчать про широке використання у їх складі металів і сплавів, які були розроблені, стандартизовані та впроваджені у серійне виробництво ще за часів колишнього СРСР. Зазначене обумовлено намаганнями агресора забезпечити максимальну продуктивність їх виробництва в умовах санкційного тиску з боку передових країн світу.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ракета «Кинжал»: особливості та характеристики гіперзвукового ракетного комплексу. URL: <https://tsn.ua/ato/giperzvukova-z-dalnistyuu-urazhennya-3-tis-km-istoriya-harakteristiki-raketnogo-kompleksu-kindzhal-2251960.html> (дата звернення: 25.03.2026).
2. Х-47М2 «Кинжал»: гіперзвукова ракета, що змінює правила війни. URL: <https://nfront.org.ua/h-47m2-kyndzhal-giperzvukova-raketa-shho-zmynuyue-pravya-viiny> (дата звернення: 25.03.2026).
3. Дмитро Шумлянський. Терор України під назвою «Кинжал»: історія, характеристики комплексу та ракети. URL: <https://military.com/uk/articles/terror-ukrayiny-pid-nazvoyu-kyndzhal-istoriya-harakteristiki-kompleksu-ta-rakety> (дата звернення: 25.03.2026).
4. Viacheslav L. Bogdanov, Alexander Ya. Grigorenko, Ihor B. Chepkov, Ihor V. Odnorolov, Andrii V. Kuchynskiy, Valerii V. Kremenytskyi, Svitlana O. Sperkach. (2025). Identification of Special-Purpose Structures by Their Fragments Based on Scanning Electron Microscopy, *Advanced Structured Materials*. Springer Nature Switzerland AG. 406 p. DOI: 10.1007/978-3-031-88827-4. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105008824257?origin=resultslist>
5. Ідентифікація країни походження безпілотних літальних апаратів на підставі аналізу елементної бази за методом сканівної електронної мікроскопії / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одроралов І.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. *Озброєння та військова техніка*. 2023. № 1(37). С. 57—62. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.1\(37\).57-62](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.1(37).57-62)
6. Застосування методу скануючої електронної мікроскопії при визначенні хімічного складу металевих фрагментів крилатих та авіаційних ракет виробництва російської федерації / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одроралов І.В., Кучинський А.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. *Озброєння та військова техніка*. 2023. № 2(38). С. 18—25. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.2\(38\).18-25](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2023.2(38).18-25)
7. Результати застосування методу скануючої електронної мікроскопії при дослідженні металевих фрагментів оперативного-тактичної ракети 9М723 ОТРК 9К720 «ИСКАНДЕР» / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одроралов І.В., Кучинський А.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. *Озброєння та військова техніка*. 2025. № 4(48). С. 45—50. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4\(48\).45-50](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4(48).45-50)
8. Марочник стали и сплавов. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата звернення: 25.03.2026).

REFERENCES

1. “Raketa «Kyndzhal»: osoblyvosti ta kharakterystyky hiperzvukovoho raketnoho kompleksa” [«Kinzhall» missile: features and characteristics of the hypersonic missile complex]. <https://tsn.ua/ato/giperzvukova-z-dalnistyuu-urazhennya-3-tis-km-istoriya-harakteristiki-raketnogo-kompleksu-kindzhal-2251960.html> (accessed: 25.03.2026).
2. “KH-47M2 «Kyndzhal»: hiperzvukova raketa, shcho zmynuyue pravyla viiny” [Kh-47M2 «Kinzhall» a hypersonic missile that changes the rules of war]. <https://nfront.org.ua/h-47m2-kyndzhal-giperzvukova-raketa-shho-zmynuyue-pravya-viiny> (accessed: 25.03.2026).
3. “Dmytro Shumlyanskiy. Teror Ukrainy pid nazvoiu «Kynzhal»: istoriia, kharakterystyky kompleksu ta rakety” [Dmytro Shumlianskiy. Ukraine's terror called «Kynzhal»: history, characteristics of the complex and the missile]. <https://military.com/uk/articles/terror-ukrayiny-pid-nazvoyu-kyndzhal-istoriya-harakterystyky-kompleksu-ta-rakety> (accessed: 25.03.2026).
4. Viacheslav L. Bogdanov, Alexander Ya. Grigorenko, Ihor B. Chepkov, Ihor V. Odnorolov, Andrii V. Kuchynskiy, Valerii V. Kremenytskyi, Svitlana O. Sperkach. (2025). Identification of Special-Purpose Structures by Their Fragments Based on Scanning Electron Microscopy. *Advanced Structured Materials*, Springer Nature Switzerland AG. 406 p. DOI: 10.1007/978-3-031-88827-4. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/105008824257?origin=resultslist>
5. Bogdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnorolov, I.V., Kremenytskyi, V.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Identyfikatsiia krainy pokhodzhennia bezpilotnykh litalnykh aparativ na pidstavi analizu elementnoi bazy za metodom skanivnoi elektronnoi mikroskopii” [Identification of the country of origin of unmanned aerial vehicles based on the analysis of the elemental base by the method of scanning electron microscopy]. *Weapons and military equipment*. No. 1(37). Pp. 57—62.
6. Bogdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnorolov, I.V., Kremenytskyi, V.V., Kuchinsky, A.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Zastosuvannia metodu skanuiuchoi elektronnoi mikroskopii pry vyznachenni khimichnogo skladu metalevykh fragmentiv krylatykh ta aviatsiinykh raket vyrobnytstva rosiiskoi federatsii” [Application of the method of scanning electron microscopy in the determination of the chemical composition of metal fragments of cruise and aircraft missiles manufactured in the russian federation]. *Weapons and military equipment*. No. 2(38). Pp. 18—25.
7. Bogdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnorolov, I.V., Kremenytskyi, V.V., Kuchinsky, A.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Rezultaty zastosuvannia metodu skanuiuchoi elektronnoi mikroskopii pry doslidzhenni metalevykh fragmentiv operatyvno-taktychnoi rakety 9M723 OTMK 9K720 «ISKANDER»” [Results of the

application of the method of scanning electron microscopy in the study of metal fragments of the 9M723 operational-tactical missile OTMK 9K720 «ISKANDER». Weapons and military equipment. No. 2(38). Pp. 18—25. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4\(48\).45-50](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2025.4(48).45-50)

8. “Marochnik stali i splavov” [Marochnik of steel and alloys]. URL: <https://www.splav-kharkov.com/main.php> (accessed: 25.03.2026).

**Bogdanov V.L., Grygorenko O.Ya, Chepkov I.B.,
Odnoralov I.B., Kremenyskiy V.V.,
Kuchinskyy A.V., Sperkach S.O.**

**RESULTS OF THE APPLICATION OF THE
METHOD OF SCANNING ELECTRON
MICROSCOPY IN THE STUDY OF METAL
FRAGMENTS OF X-47M2 «KINZHAL» (9-A-7660)
HYPERSONIC AEROBALLISTIC MISSILES**

This paper presents the results of applying scanning electron microscopy and X-ray microanalysis to the study of metallic fragments of the X-47M2 «Kinzhall» (9-A-7660) hypersonic aeroballistic missile. The relevance of the study is determined by the need to establish a reliable information base on the materials used in modern air attack weapons for the purposes of technical identification, reconstruction of design and technological solutions, and development of approaches to detection and counteraction. According to the analyzed technical materials, the X-47M2 «Kinzhall» missile is considered a deeply modernized version of the 9M723F missile of the «Iskander-M» system, which explains the continuity of a number of structural and material engineering solutions.

The study covered several structural fragments of the missile, including a body fragment, a tail section fragment, an internal structural fragment, a load-bearing structural fragment, an aerodynamic control surface fragment, and a body plug. The obtained elemental composition data made it possible to identify the probable material types used in these components. It was established that the missile body fragment is made of an aluminum-magnesium alloy of the AMg6 type, which is characterized by low density, sufficient strength, and corrosion resistance. The tail section fragment corresponds in composition to low-alloy heat-resistant steel of the 18X3MB type. The internal and load-bearing structural fragments were identified as being most likely made of high-alloy heat-resistant steel of the 12X25H16Г7AP type. The aerodynamic control surface fragment was found to correspond to a nickel-based heat-resistant alloy of the XH56BMТЮ type, while the body plug material was identified as a heat-resistant corrosion-resistant steel of the 08X16H13M2B type.

The results demonstrate that the material structure of the Kh-47M2 «Kinzhall» missile is functionally differentiated. Lightweight aluminum alloys are used in elements where low weight is the determining factor, whereas heat-resistant steels and nickel alloys are employed in structurally loaded and thermally stressed components. Such a combination of materials is consistent with the general principles of designing special-purpose aerospace structures, in which

the selection of materials is governed by the balance between strength, heat resistance, corrosion resistance, manufacturability, and weight efficiency.

The obtained results may be used to develop databases for identifying missile fragments, to support forensic and technical examination of weapon remnants, and to improve understanding of the structural and technological features of modern hypersonic and aeroballistic missile systems. They also confirm the effectiveness of scanning electron microscopy as a tool for material identification of missile components under conditions where direct access to design documentation is unavailable.

Keywords: scanning electron microscopy, X-ray microanalysis, metallic fragments, hypersonic aeroballistic missile, X-47M2 Kinzhall, material identification, heat-resistant steels, aluminum alloys, nickel-based alloys.

Відомості про авторів:

Богданов В'ячеслав Леонідович

академік НАН України
доктор фізико-математичних наук
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

Григоренко Олександр Ярославович

академік НАН України
доктор фізико-математичних наук
Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>

Чепков Ігор Борисович

доктор технічних наук, професор
член-кореспондент НАН України
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>

Одноралов Ігор Васильович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>

Кучинський Андрій Володимирович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>

Кремєницький Валерій Вікторович

кандидат фізико-математичних наук
Технічний центр НАН України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>

Сперкач Світлана Олексіївна

кандидат фізико-математичних наук
Технічний центр НАН України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>

Information about the authors:**Bogdanov Viacheslav**

Academician of the NAS of Ukraine
Doctor of Physics and Mathematics
Institute of Mechanics named S.P. Tymoshenko of the
NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

Grygorenko Oleksandr

Academician of the NAS of Ukraine
Doctor of Physics and Mathematics, Professor
Institute of Mechanics named S.P. Tymoshenko of the
NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4109-2672>

Chepkov Igor

Doctor of Technical Sciences, Professor
Corr. Member NASU
Central Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>

Odnoralov Igor

Doctor of Technical Sciences
Senior Research
Central Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7151-3175>

Kuchinskyi Andrii

Candidate of Technical Sciences
Senior Scientist, Doctoral Student
Central Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1687-9393>

Kremenyskyi Valerii

Candidate of Physics and Mathematics
Technical Center of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1448-6323>

Sperkach Svitlana

Candidate of Physics and Mathematics
Technical Center of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3168-6300>

Стаття прийнята до редколегії 09.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 623.746.5:629.735.05

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).53-58](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).53-58)

Д. Б. КУЧЕР, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

Р. С. ПАШИНСЬКИЙ

<https://orcid.org/0009-0007-2589-3553>

(Інститут Військово-Морських Сил НУ «Одеська морська академія»)

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ПОРУШЕНЬ РОБОТИ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА ПРОТИВНИКА ЗОВНІШНІМ ВІБРАЦІЙНИМ ВПЛИВОМ

Метою статті є теоретичний аналіз та математичне моделювання фізичних механізмів порушення роботи MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) акселерометрів інерціальних навігаційних систем БПЛА під впливом зовнішнього вібраційного збудження резонансного характеру в умовах придушення Global Navigation Satellite System, GNSS сигналу засобами РЕБ. Методологія ґрунтується на динамічному моделюванні мікромеханічного акселерометра як коливальної системи другого порядку та аналізі передатних функцій у частотній області. Вібраційний вплив є перспективним та економічно обґрунтованим некінетичним доповненням до ешелюваної системи протиповітряної оборони.

Ключові слова: БПЛА, MEMS акселерометр, інерціальна навігаційна система, вібраційний вплив, резонанс, LRAD, некінетична протидія, похибка позиціонування.

ВСТУП

Сучасний характер збройних конфліктів, зокрема повномасштабної війни росії проти України, характеризується широким застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних класів від малих комерційних квадрокоптерів до ударних дронів-камікадзе типу Shahed-136, БПЛА типу Lancet та FPV-дронів. За даними відкритих джерел, лише у 2024–2025 роках противник застосував понад 30–40 тис. одиниць БПЛА-камікадзе, що робить їх одним із ключових засобів ураження критичної інфраструктури, позицій Збройних Сил України та цивільних об'єктів [6, 7].

Необхідність ефективної протидії БПЛА зумовлена тим, що традиційні засоби ППО є економічно нерациональними, так як один снаряд до ЗРК ППО може коштувати в десятки разів дорожче за БПЛА-ціль. Тому перспективним є пошук некінетичних, асиметричних методів порушення навігації БПЛА противника [6]. У більшій кількості сучасних БПЛА противника вико-

ристовується комбінована система навігації, яка складається з супутникової (Global Navigation Satellite System, GNSS), безплатформеної інерціальної навігаційної системи (БІНС) та в окремих випадках, оптичної чи радіолокаційної корекції [7, 8]. Умови активного радіоелектронного придушення GNSS сигналу змушують БПЛА переходити на автономний інерціальний режим польоту, де точність траєкторії повністю залежить від якості показань мікроелектромеханічних інерціальних вимірювальних блоків (Inertial Motion Unit, IMU). Це може свідчити, що порушення роботи акселерометрів та гіроскопів стає одним із перспективних напрямів асиметричної протидії БПЛА [8].

Мікроелектромеханічні акселерометри (MEMS), які становлять основу більшості IMU в комерційних та напівпрофесійних БПЛА противника, є механічними системами з підвішеною інерційною масою, чутливими до зовнішніх механічних збуджень. Дослідження останніх років [1–3] показали, що спрямований акустичний або вібраційний вплив на резонансних частотах (зазвичай 2–30 кГц для акселерометрів серій ADXL, MPU, ICM, BMI) призводить до двох основних типів порушень:

- введення постійного або повільного змінного зсуву показань, що накопичується в інтегральній навігації та викликає значне відхилення від розрахункової траєкторії;
- контрольоване спотворення сигналу, яке може імітувати хибні прискорення та змусити БПЛА відхилитися від курсу, втратити стабільність або здійснювати неконтрольовані маневри аж до звалювання.

На відміну від акустичних атак, які вже детально вивчені [1, 4, 5], вібраційний вплив залишається менш дослідженим, хоча має низку переваг: більшу дальність поширення в певних середовищах, меншу залежність від напрямленості джерела та потенціал інтеграції в наземні, мобільні чи навіть дронів системи протидії. В умовах щільного використання БПЛА противником створення зовнішнього вібраційного поля може стати дешевим доповненням до РЕБ та кінетичних засобів ураження [6].

Метою статті є аналіз фізичних механізмів порушення роботи MEMS-акселерометрів під впливом зовнішнього вібраційного збудження, оцінка вразливості типових IMU, що застосовуються в БПЛА противника (зокрема в БПЛА типу Shahed-136 та FPV-дронах), та оцінка практичної реалістичності такого методу протидії в реальних умовах бойового застосування.

Актуальність теми зумовлена не лише поточною війною, а й глобальною тенденцією до масового використання низьковартісних БПЛА в асиметричних конфліктах, де традиційні засоби ППО стають економічно неефективними. За статистикою, наведеною в [9], до 67 % відмов БПЛА пов'язані з відмовами механічних систем, з яких 53 % припадає на систему рушійної установки, що вказує на значну механічну вразливість платформи загалом. Розробка та впровадження некінетичних методів порушення навігації противника може суттєво підвищити ефективність протидії БПЛА за мінімальних витрат.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроелектромеханічні акселерометри MEMS є ключовим компонентом безплатформених інерціальних навігаційних систем сучасних БПЛА, зокрема тих, що застосовуються противником. Як зазначено у [7], INS на основі MEMS датчиків є основою побудови сучасних дронів завдяки їх здатності до швидкої та точної обробки даних, зокрема в умовах, де GPS-сигнал може бути недоступний або ненадійний. Це особливо актуально для польотів в урбанізованих зонах або в зонах з високим рівнем електромагнітних перешкод. MEMS акселерометри в складі IMU забезпечують вимірювання лінійних прискорень по трьох взаємно ортогональних осях, що необхідно для стабілізації польоту, компенсації дрейфу гіроскопів та інерціальної навігації в умовах придушення GNSS-сигналу [7, 8].

Структура сучасного ємнісного одноосового акселерометра показана на рис. 1.

До складу такого акселерометра входять такі компоненти:

- 1 – чутлива (інерційна) маса;
- 2 – пружинні (торсіонні) підвіси;
- 3 – ємнісні контакти;
- 4 – нерухома частина датчика (якір).

Принцип роботи акселерометра заснований на визначенні зсуву інерційної маси (1) відносно нерухомих частини (4) з перетворенням його на пропорційний електричний сигнал ємнісним методом (рис. 1). Ємнісні контакти (3) акселерометра складаються з набору пластин, одні з яких нерухомі (прикріплені до якоря), інші вільно переміщуються разом з чутливою масою під дією сили гравітації або руху об'єкта (рис. 1, 2).

Пластини утворюють конденсатор, ємність якого змінюється в залежності від положення та відстані між пластинами (рис. 2).

Напруги $u_1(t)$ і $u_2(t)$ на електродах, що не рухаються, є вхідними. Напруга $u_3(t)$ на електродах, з'єднаних з інерціальною масою (рухомих електродах), є вихідним сигналом. Ємності обох конденсаторів залежать від зовнішнього прискорення і змінюються на величину $x(t)$

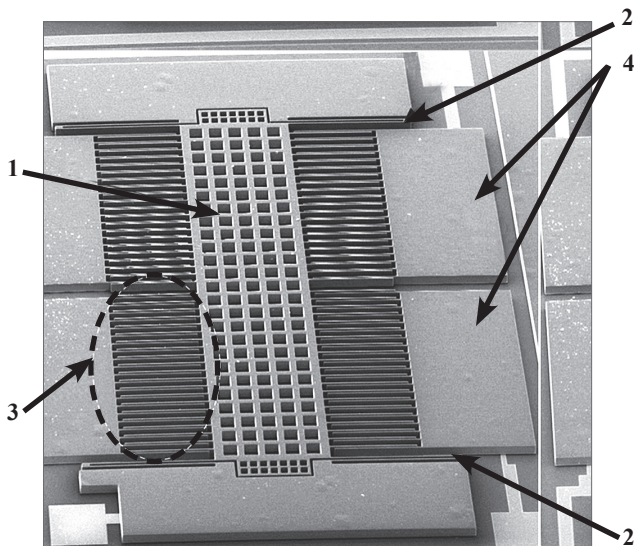


Рис. 1. Мікрофотографія одноосового MEMS акселерометра

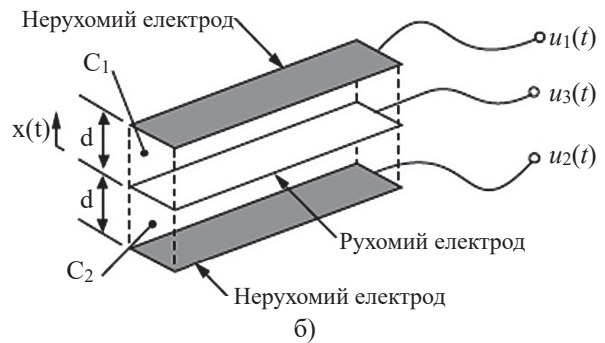
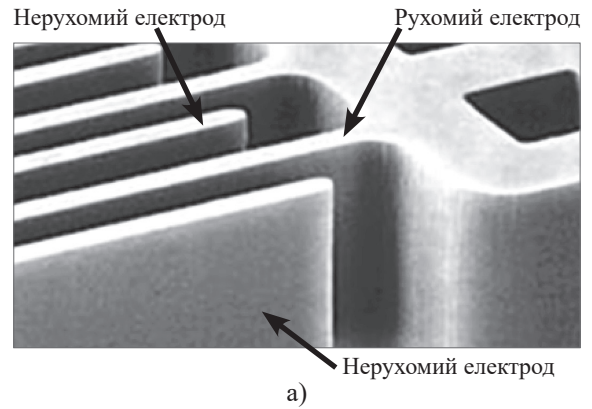


Рис. 2. Ємнісні контакти акселерометра: а) мікрофотографія; б) з'єднання електричних ємностей у контактах

(рис. 2б). Враховуючи, що відстань між пластинами d набагато більша за можливі переміщення інерційної маси $x(t)$ вздовж осі, можна зробити висновок, що отримана геометрія контактів являє собою ємнісний напівміст (так званий напівміст Шерінга), схема якого представлена на рис. 3.

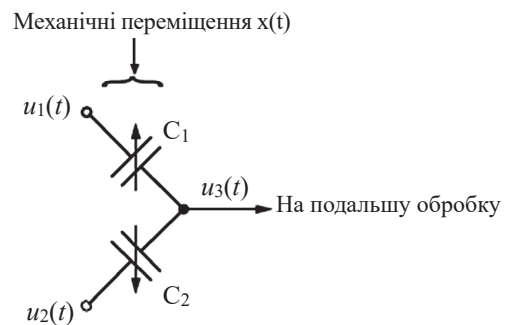


Рис. 3. Ємнісний напівміст, що формується геометрією пластин електродів акселерометра

Ємності двох конденсаторів, утворених рухомими та нерухомими пластинами акселерометра, визначаються зміщенням $x(t)$ інерційної маси:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d - x(t)}; \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d + x(t)}, \quad (1)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; ϵ – відносна діелектрична проникність між пластинами; A – ефективна площа пластини; d – номінальний зазор у стані спокою.

При умові $|x(t)| \ll d$ вихідна напруга ємнісного напівмосту лінійна [8]:

$$U_{\text{вих}} \approx U_{\text{ref}} \cdot \frac{x(t)}{d}. \quad (2)$$

Лінійна залежність означає, що будь-яке вібраційне збудження, яке модулює зміщення $x(t)$, безпосередньо потрапляє у вимірювальний канал як хибне прискорення.

З динамічної точки зору MEMS-акселерометр є коливальною системою другого порядку: підвищена інерційна маса m на пружинних підвісах жорсткістю k з в'язким демпфуванням. Власна резонансна частота [1–3]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3)$$

де k [Н/м] – ефективна жорсткість підвісів; m [кг] – маса. Для типових MEMS-акселерометрів, таких як: ADXL345, MPU-6050, ICM-42688, тощо, де $f_0 = 1\text{--}40$ кГц.

Передачна функція у частотній (нормованій) формі:

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \cdot 2\zeta \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}, \quad (4)$$

де K – статична чутливість [В/г]; $\omega_0 = 2\pi f_0$; ζ – коефіцієнт демпфування (0,3–0,7 для вакуумних MEMS-структур). При $\omega \rightarrow \omega_0$ амплітуда відгуку зростає у $Q = 1/(2\zeta)$ разів. Відповідно, зміщення показань акселерометра при вібраційному впливі амплітудою $A_{\text{ехт}}$:

$$\Delta\alpha \approx A_{\text{ехт}} \cdot \frac{K}{2\zeta}. \quad (5)$$

Похибки сучасних MEMS-акселерометрів включають [7]: нестабільність зсуву (50–500 мкг), випадкове блукання швидкості (шум приблизно дорівнює 100–500 мкг), похибка масштабного коефіцієнта (0,5–2 %).

Резонансні частоти MEMS-структур (1–40 кГц) роблять їх чутливими до вібрацій, особливо якщо частота збудження потрапляє в діапазон, де анти-аліасингові фільтри (це спеціальні фільтри низьких частот, які використовуються для запобігання явищу спотворення сигналу при дискретизації) на виході АЦП не фільтрують механічні резонанси, які проявляються як постійне зміщення нуля у цифровому сигналі, а не як височастотний, ВЧ шум.

Важливим аспектом є механізм поширення зовнішнього вібраційного впливу від джерела до ІМУ в корпусі БПЛА. За результатами структурного аналізу вібрацій БПЛА, проведеного в роботі [9], вібраційна енергія від зовнішніх джерел збудження ефективно поширюється через конструкцію платформи. Авторами встановлено, що перша і друга власні частоти вигину крила типового БПЛА становлять 12,3 Гц та 17,5 Гц відповідно, а максимальні амплітуди коливань зосереджені на кінцях крил та поблизу двигуна. Суттєво, що доменна частота 23 Гц реєструвалась усіма шістьма акселерометрами, розташованими вздовж всієї конструкції, що підтверджує ефективну передачу вібраційної енергії по всій поверхні БПЛА [9]. Це означає, що зовнішнє вібраційне збудження може досягати ІМУ, навіть якщо БПЛА не контактує безпосередньо з джерелом.

Механічна трансдукція через корпус (контактна вібрація) є найефективнішим механізмом для наземних систем протидії. Вібрація передається безпосередньо

через кріплення плати ІМУ, корпус БПЛА або опорну поверхню. Резонансні властивості конструкції можуть підсилювати амплітуду в 5–20 разів.

Вихідні сигнали трьох акселерометрів БНС при наявності вібраційного впливу можна представити у вигляді [8]:

$$\begin{aligned} U_{ax} &= K_x (\alpha_x + \Delta\alpha_x) + U_{ax0} + n_{ax} U_{ay} = \\ &= K_y (\alpha_y + \Delta\alpha_y) + U_{ay0} + n_{ay} U_{az} = \\ &= K_z (\alpha_z + \Delta\alpha_z) + U_{az0} + n_{az}, \end{aligned} \quad (6)$$

де U_{ax} , U_{ay} , U_{az} – вихідні сигнали акселерометрів; α_x , α_y , α_z – проекції прискорення по осях; $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$, $\Delta\alpha_z$ – відхід акселерометрів під зовнішнім вібраційним впливом; K_x , K_y , K_z – масштабні коефіцієнти; U_{ax0} , U_{ay0} , U_{az0} – зміщення нулів; n_{ax} , n_{ay} , n_{az} – вплив зовнішніх вібраційних коливань.

Накопичена похибка позиції БПЛА внаслідок постійного зміщення показань акселерометра $\Delta\alpha$ (вібраційного зміщення) наростає квадратично в часі:

$$\delta P(t) = \frac{1}{2} \cdot \Delta\alpha \cdot t^2, \quad (7)$$

де $\Delta\alpha$ [м/с²] – штучно введений вібраційний зсув; t [с] – час автономного польоту. Числові приклади: при $\Delta\alpha \approx 0,2\text{г} \approx 2$ м/с² та $t = 30$ с: $\delta P = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 900 = 900$ м; при $\Delta\alpha \approx 0,5$ м/с² та $t = 60$ с: $\delta P = 900$ м.

Як показано в роботі [7], мікромеханічні ІНС без корекції за сигналами GNSS накопичують похибку до 3 м/хв. по горизонталі та 2 м/хв. по вертикалі, тобто здатні підтримувати прийнятну точність польоту лише на рівні 100–150 м протягом не більше 10 хв. Будь-яке додаткове зміщення нуля акселерометра суттєво прискорює цей процес.

Вразливість MEMS-акселерометрів набуває особливої практичної значущості в умовах сучасних бойових дій. Теоретичні механізми введення зсуву вихідних даних та контрольованого спотворення вихідного сигналу, підтверджені численними експериментами [1, 2], відкривають шлях до створення спеціалізованих засобів некінетичної протидії, здатних генерувати спрямоване акустичне або вібраційне поле на значних відстанях. Одним із найбільш ефективних і вже апробованих у практиці інструментів для реалізації такого впливу є Long Range Acoustic Devices (LRAD) – це спрямовані акустичні випромінювачі великої потужності (рис. 4).



Рис. 4. Спрямовані акустичні випромінювачі великої потужності (LRAD)

LRAD використовує масив п'єзоелектричних пєтворювачів, які генерують звук у фазі, що створює вузький спрямований промінь з концентрацією енергії вперед. Робоча частота LRAD, переважно 2–3 кГц, обрана як компроміс між шириною променя та поглинанням у повітрі. Частоти понад 10 кГц швидко згасають на відстанях понад 100–200 м [6]. Розглядається як потенційний засіб порушення роботи MEMS акселерометрів та гіроскопів дронів через резонансний акустичний вплив.

Рівень звукового тиску LRAD на відстані r від джерела визначається через геометричне та молекулярне загасання:

$$L_p(r) = L_0 - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - \alpha \cdot (r - r_0), \quad (8)$$

де L_0 – рівень тиску на опорній відстані $r_0 = 1$ м; α – коефіцієнт молекулярного поглинання (при $f = 2,5$ кГц; $\alpha \approx 0,005\text{--}0,01$ дБ/м). Приклад: $r = 100$ м, $f = 2,5$ кГц $\rightarrow L_p \approx 143 - 40 - 0,5 \approx 102,5$ дБ – рівень, достатній для дестабілізації незахищеного MEMS IMU.

Дослідження з питань акустичного придушення автономних навігаційних систем БПЛА, засновані на аналізі мікромеханічних інерціальних систем, показали реальність цього підходу [8]. Зокрема, вченими з інституту KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) було встановлено, що гіроскоп як механічна система має свою резонансну частоту, і підібраний за частотою акустичний вплив може викликати резонанс у гіроскопі, що призведе до його неправильної роботи та видачі помилкових навігаційних даних.

Результати аналізу 15 найпоширеніших моделей MEMS-гіроскопів та акселерометрів у комерційних малих БПЛА показали, що 47 % з них схильні до резонансу [8], який впливає на канал орієнтації в горизонтальній площині.

Метод зовнішнього вібраційного впливу на MEMS акселерометри БІНС БПЛА противника є перспективним напрямком некінетичної протидії [6, 8]. Переваги методу полягають в тому, що він доповнює РЕБ, не залежить від радіоканалів, працює проти GNSS-незалежних БПЛА, при цьому, як зазначено в [6], традиційні засоби РЕБ стають менш ефективними в міру підвищення автономності БПЛА. Використання портативних LRAD-подібних систем або тактильних вібраторів, значно дешевших за ракети ППО, дозволяє впливати одночасно на кілька дронів у секторі та викликає дезорієнтацію навіть без прямого впливу на IMU.

Обмеження методу включають: необхідність знати резонансну частоту конкретного IMU, залежність від відстані та атмосферних умов, можливу адаптацію конструкторами БПЛА противника (встановлення поглинаючих матеріалів, вібраційної ізоляції IMU, алгоритмів цифрової фільтрації). Крім того, слід враховувати, що в середніх та важких БПЛА з повноцінною інтегрованою навігаційною системою порушення одного каналу, як правило, виявляється системою і компенсується [7].

ВИСНОВКИ

Теоретичні моделі та чисельне моделювання підтверджують, що зовнішнє прискорення амплітудою 0,2–3g

на резонансній частоті достатнє для суттєвого спотворення вихідного сигналу MEMS-акселерометра [1–3]. Експериментальні дані з літератури [1, 4, 5] та аналогічні випробування показують, що таке спотворення призводить до швидкого накопичення похибки позиції (50–500 м за 30–120 с автономного польоту), втрати стабільності та, в багатьох випадках, звалювання БПЛА у штопор.

Практична ефективність методу в бойових умовах суттєво визначається класом цілі. Для малих низьковисотних апаратів, таких як FPV та окремі модифікації БПЛА типу Lancet вона є високою і ймовірність зриву траєкторії польоту або падіння сягає від 70 до 90 %. Для середніх безпілотників камікадзе показник результативності є середнім і становить від 30 до 60 %. Стосовно великих систем дальньої дії типу Shahed 136 результативність оцінюється як низька або середня і варіюється від 10 до 50 % лише за умови польоту на малій висоті та інтенсивного енергетичного впливу. Ці оцінки узгоджуються з аналізом структурної вразливості БПЛА різних класів, наведеним у [9, 10].

Наразі метод вібраційного впливу не є універсальним засобом протидії, але має значний потенціал як дешеве та асиметричне доповнення до існуючих систем РЕБ, кінетичних засобів ППО, FPV-перехоплювачів та акустичного виявлення. Його інтеграція в ешелоновану систему протиповітряної оборони може суттєво підвищити загальну ефективність знищення або відведення БПЛА противника, особливо в умовах масованих нічних атак [6, 8].

Для реалізації методу потрібні портативні LRAD-подібні системи потужністю понад 140 дБ, з частотою випромінювання від 2 до 30 кГц.

Отримані результати підтверджують, що зовнішній вібраційний вплив є реальним і технічно досяжним механізмом порушення роботи навігаційних систем БПЛА противника. Його подальша розробка та впровадження може стати важливою складовою асиметричної відповіді на масове застосування противником БПЛА в сучасній війні [6, 7].

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Trippel, T., Weisse, O., Xu, W., Honeyman, P. & Fu, K. (2017). WALNUT: A Jolt to the Ear Makes Drones Fall from the Sky. Proc. of the 10th ACM Conf. on Security & Privacy in Wireless and Mobile Networks (WiSec). Pp. 3–15.
2. Jeong, S. (2023). Don't Knock! Rowhammer at the Fingertips of Android Smartphones. IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P). Pp. 101–115.
3. Guo, Q., Wang, Y. & Li, J. (2021). A Survey on Sensor Attacks on MEMS-Based IMU. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. Vol. 18. No. 2. Pp. 1001–1016.
4. Son, Y., Shin, H. & Kim, D. (2015). Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors. USENIX Security Symposium. Pp. 881–896.
5. Nashimoto, S. (2018). Sensor CON-Fusion: Defeating Kalman Filter in Signal Injection Attack. ACM ASIACCS. Pp. 511–524.

6. Mathur, A. (2022). Drones & Counter-Drone Systems. New Delhi : Centre for Air Power Studies. New Delhi Paper No. 10. 152 p.
7. Долінце Б.І. Методи та засоби підвищення точності обробки інформації в бортових підсистемах БПЛА : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Нац. авіаційний ун-т. Київ. 2024. 215 с.
8. Шум А.В. Аналіз стійкості навігаційних систем БПЛА : кваліфікаційна робота магістра. Харківський нац. ун-т радіоелектроніки. Харків. 2024. 71 с.
9. González-Cabrera, S.I., Camacho-Zamora, N. & Rojas-Ramirez, S.-R. (2026). Structural Vibration Analysis of UAVs under Ground Engine Test Conditions. Sensors. Vol. 26. No. 2. Art. 583. <https://doi.org/10.3390/s26020583>.
10. Evdokimenkov, V.N., Kozorez, D.A. & Rabinskiy, L.N. (2021). Unmanned aerial vehicle evasion maneuvers from enemy aircraft attack. J. of the Mechanical Behavior of Materials. Vol. 30. Pp. 87—94. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0009>.
11. Fractal Antenna Systems. Acoustic Resonance Machine (ARM) for Counter-UAV Applications. 2025. URL: <https://www.fractenna.com>.

REFERENCES

1. Trippel, T., Weisse, O., Xu, W., Honeyman, P. & Fu, K. (2017). WALNUT: A Jolt to the Ear Makes Drones Fall from the Sky. Proc. of the 10th ACM Conf. on Security & Privacy in Wireless and Mobile Networks (WiSec). Pp. 3—15.
2. Jeong, S. (2023). Don't Knock! Rowhammer at the Fingertips of Android Smartphones. IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P). Pp. 101—115.
3. Guo, Q., Wang, Y. & Li, J. (2021). A Survey on Sensor Attacks on MEMS-Based IMU. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. Vol. 18. No. 2. Pp. 1001—1016.
4. Son, Y., Shin, H. & Kim, D. (2015). Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors. USENIX Security Symposium. Pp. 881—896.
5. Nashimoto, S. (2018). Sensor CON-Fusion: Defeating Kalman Filter in Signal Injection Attack. ACM ASIACCS. Pp. 511—524.
6. Mathur, A. (2022). Drones & Counter-Drone Systems. New Delhi : Centre for Air Power Studies. New Delhi Paper No. 10. 152 p.
7. Dolintse, B.I. “Metody ta zasoby pidvychnennia tochnosti obrobky informatsii v bortovykh pidsystemakh BpLA” [Methods and means of increasing the accuracy of information processing in onboard UAV subsystems]. Candidate's thesis in Technical Sciences. Nat. Aviation Univ. K. 2024. 215 p.
8. Shum, A.V. “Analiz stiikosti navihatsiinykh system BpLA” [Stability analysis of UAV navigation systems]. Master's thesis. Kharkiv Nat. Univ. of Radio Electronics. Kharkiv. 2024. 71 p.
9. González-Cabrera, S.I., Camacho-Zamora, N. & Rojas-Ramirez, S.-R. (2026). Structural Vibration Analysis of UAVs under Ground Engine Test Conditions. Sensors. Vol. 26. No. 2. Art. 583. <https://doi.org/10.3390/s26020583>.

Kucher D.B., Pashynskiy R.S.

ON THE POSSIBILITY OF DISRUPTING ADVERSARIAL UAV NAVIGATION SYSTEM ACCELEROMETERS VIA EXTERNAL VIBRATIONAL IMPACT

The purpose of this article is the theoretical analysis and mathematical modelling of physical mechanisms behind the disruption of MEMS accelerometers in UAV inertial navigation systems under external resonant vibrational excitation in conditions where GNSS signals are suppressed by electronic warfare means. The methodology is based on dynamic modelling of the MEMS accelerometer as a second-order oscillatory system and transfer function analysis in the frequency domain. It is demonstrated that excitation at sensor resonant frequencies (2–30 kHz, typical for ADXL, MPU, ICM series) causes two types of disruption: output biasing (a constant or slowly varying zero offset) and output control (controlled signal distortion). The positioning error of the UAV is shown to grow quadratically over time, reaching 50–900 m within 30–120 s of autonomous flight. An analysis of vibration energy propagation through the UAV airframe confirms that external excitation can effectively reach the IMU without direct contact with the source. The practical feasibility of using Long Range Acoustic Devices (LRAD, sound pressure level ≥ 102.5 dB at 100 m) as an asymmetric non-kinetic countermeasure is substantiated. Differentiated effectiveness is established: high (70–90 %) against small FPV systems; moderate (30–60 %) against large kamikaze UAVs; low-to-moderate (10–50 %) against large long-range platforms such as Shahed-136. Vibrational disruption is concluded to be a cost-effective non-kinetic complement to layered air defence, particularly against GNSS-independent autonomous platforms.

Keywords: UAV, MEMS accelerometer, inertial navigation system, vibrational disruption, resonance, LRAD, non-kinetic countermeasure, Shahed-136, output biasing, positioning error.

Відомості про авторів:**Кучер Дмитро Борисович**

доктор технічних наук, професор
Інститут Військово-Морських Сил
Національного університету
«Одеська морська академія»
м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

Пашинський Роман Сергійович

Інститут Військово-Морських Сил
Національного університету
«Одеська морська академія»
м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-2589-3553>

Information about the authors:**Kucher Dmytro**

Doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of Naval Forces
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

Pashynskyi Roman

Institute of Naval Forces
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-2589-3553>

Стаття надійшла до редколегії 04.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 623.746.5:629.735.05

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).59-66](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).59-66)**В. С. ТРИГУБ**<https://orcid.org/0009-0005-2142-8780>*(Інститут Військово-Морських Сил НУ
«Одеська морська академія», м. Одеса)***І. А. БІЛАН**<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>*(Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз, м. Київ)*

КОМБІНОВАНЕ АКУСТИКО-ТЕПЛОВІЗІЙНЕ ДОНАВЕДЕННЯ АВТОНОМНИХ ДРОНІВ-ПЕРЕХОПЛЮВАЧІВ НА МАЛОШВИДКІСНІ ПОВІТРЯНІ ЦІЛІ ТИПУ SHAHED-136

У статті розглянуто перспективний напрямок дослідження систем пасивного донаведення автономних дронів-перехоплювачів для знищення малошвидкісних БПЛА-камікадзе типу Shahed-136 (Герань-2).

Робота є початковим етапом дослідження, спрямованим на пошук ефективних технічних рішень для створення повністю пасивних, низьковартісних і стійких до радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) систем донаведення.

Ключові слова: дрони-перехоплювачі, акустичне виявлення, тепловізійне наведення, Shahed-136, пропорційна навігація, сенсорне злиття, гармонічний аналіз, згорткова нейронна мережа, кінцевий автомат, подавлення власного шуму.

ВСТУП

Повномасштабна війна в Україні виявила критичну вразливість традиційних систем протиповітряної оборони до масованого застосування малошвидкісних БПЛА-камікадзе типу Shahed-136 (Герань-2). Зазначені цілі рухаються на висотах 50–150 м зі швидкістю 150–180 км/год., мають низьку радіолокаційну помітність (ефективна поверхня розсіювання менше 0,1 м² завдяки переважно композитному планеру малого розміру), слабе інфрачервоне випромінювання через часткове маскування вихлопної системи та відносно низьку вартість, приблизно 20–50 тис. USD за одиницю.

Традиційні зенітно-ракетні комплекси забезпечують дальність виявлення малих БПЛА у діапазоні кількох кілометрів, проте не здатні ефективно діяти в умовах масованого застосування роїв дешевих БПЛА-камікадзе. Висока вартість перехоплення, необхідність активного радіовипромінювання, що демаскує позицію, та обмежений боєкомплект роблять їх малоприсадибними для цього класу загроз [1–5].

Актуальним науковим напрямком є розробка автономних дронів-перехоплювачів класу 7–10 доймів, здатних виконувати пасивне донаведення за фізичними полями цілі без будь-якого активного випромінювання. Ключова перевага такого підходу – це повна стійкість до засобів РЕБ та економічна ефективність, що робить масове застосування роїв раціональним.

Представлена стаття є першим етапом розробки загальної методики доведення дронів-перехоплювачів за фізичними полями ударних БПЛА противника. В подальших роботах методика буде розширена на радіочастотне та оптичне фізичні поля, а також на комплексне наведення відповідно до систематики, обґрунтованої у базових методологічних дослідженнях. Вибір акустичного та теплового полів як першочергових обумовлений найбільшою практичною актуальністю для цілей типу Shahed-136 та наявністю верифікованої сенсорної бази для їх реєстрації.

В Україні вже випробовуються акустичні мережі виявлення типу Sky Fortress та ARes із дальністю виявлення Shahed до 5 км, а також FPV-перехоплювачі STING та OSIRIS UEB-1 із тепловізійними головками самонаведення [12, 13]. Проте комбіноване акустико-тепловізійне донаведення на борту одного автономного перехоплювача з пропорційною навігацією, сенсорним злиттям і фільтрацією власного шуму у відкритій науковій літературі описано недостатньо. Запропонований у роботі напрямок спрямований на заповнення цієї прогалини.

Мета роботи – це теоретичне обґрунтування та постановка напрямку дослідження комбінованого акустико-тепловізійного донаведення як перспективного шляху вирішення проблеми перехоплення Shahed-136 та аналогічних БПЛА.

Для досягнення мети сформульовано такі завдання:

- 1) провести порівняльний аналіз акустичних сигнатур Shahed-136 та інших типів БПЛА для оцінки універсальності запропонованого підходу;
- 2) проаналізувати фізичні поля малошвидкісних повітряних цілей типу Shahed-136 (акустичне та теплове) з метою виявлення характерних сигнатур, придатних для пасивного виявлення;
- 3) обґрунтувати вибір сенсорної бази (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) мікрофонів серії Infineon IM73A135 для акустичного каналу та неохолоджених сенсорів довгохвильового інфрачервоного випромінювання LWIR з тепловізійною чутливістю NETD до 25 мК;
- 4) розробити концепцію архітектури сенсорного злиття та кінцевого автомата (Finite State Machine, FSM) для динамічного перемикання між акустичним і тепловізійним каналами;
- 5) виконати математичне моделювання співвідношення сигнал/шум (Signal to Noise Ratio, SNR) та пропорційної навігації (розрахунок точки зустрічі);
- 6) визначити основні технічні обмеження та напрямки подальших досліджень.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

ТА АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ СИГНАТУР БПЛА

Аналіз відомих технічних рішень у сфері протидії малорозмірним БПЛА дозволяє виявити ключову про-

Таблиця 1. Порівняльний аналіз існуючих систем протидії БПЛА

Система	Принцип	Активне чи пасивне	Дальність, км	Стійкість до РЕБ	Обмеження
SAN [26]	Сітка та RF глушіння	Активне	до 0,3	Низька	Потребує RF сигналу
Goodrich US10399674 [27]	Перехоплення сіткою	Активне	до 6 м	Низька	Потребує наземного радару та оператора
Sky Fortress та ARes [12]	Акустична мережа	Пасивне	до 5	Висока	Лише виявлення, без наведення
STING та OSIRIS UEB-1 [12]	LWIR головка самонаведення	Пасивне	до 0,5	Висока	Ефективне лише на термінальній фазі, вразливе до теплового фону
Nyzhnyk & Partyka (концепція) [28]	RF, акустика та оптика	Пасивне	5–7	Висока	Відсутній алгоритм пріоритизації каналів та FSM
Запропонована система	Акустика та LWIR	Повністю пасивне	до 3,2 (суша) та 5,8 (море)	Максимальна (до 95 %)	Параметри підлягають верифікації в MATLAB

галину: жодна з існуючих систем не реалізує повністю пасивного бортового донаведення з комбінуванням акустичного та теплового каналів. У табл. 1 наведено порівняльний аналіз найбільш відомих систем [6, 25–29].

Аналіз табл. 1 свідчить, що запропонований підхід є єдиним серед розглянутих, який поєднує повну пасивність на всіх фазах наведення з алгоритмічним механізмом адаптивного перемикавання між сенсорними каналами. Найближчим аналогом за принципом є концепція Nyzhnyk & Partyka [28], однак вона не формалізує логіку управління каналами у вигляді кінцевого автомата та не вирішує задачу подавлення власного шуму перехоплювача.

Для обґрунтування доцільності та універсальності запропонованого напрямку дослідження проведено порівняльний аналіз акустичних сигнатур поширених типів БПЛА на основі робіт [1–5].

Багатороторні квадрокоптери (типу DJI Mavic 3, Mavic Pro Platinum). Основні гармоніки 200–400 Гц, менш виражені низькочастотні складові. Ефективна дальність акустичного виявлення: з одним мікрофоном сягає близько 78 м, з урахуванням використання згорткових нейронних мереж (Convolutional neural network, CNN) до 200 м [1, 2].

FPV-дрони 7-дюймові. Домінуючі гармоніки 300–900 Гц із вираженими піками від безколекторних двигунів. Швидкість польоту до 120 км/год. Пропорційна навігація з коефіцієнтом $N = 4,5$ компенсує різкі зміни курсу. Акустична дальність сягає 150–300 м, тепла від 400 м [2, 3].

БПЛА з нерухомим крилом (типу Лелека-100, Фурія). Гармоніки 1000–2000 Гц. Дальність акустичного виявлення до 500 м. Вищий тепловий контраст через поршневі двигун прискорює перехід на термінальну фазу [5].

Гібридні VTOL та однороторні гелікоптери. Виражена «гвинтова» модуляція з когерентними радіо та акустичними гармоніками. Застосовується спільний гармонічний аналіз для злиття акустичного та RF-каналів [2, 4].

Малі електричні FPV-камікадзе. Низькочастотні піки 150–300 Гц. Дальність виявлення з IM73A135 ся-

гає до 1 км. Комбінована система компенсує слабкий тепловий сигнал раннім захопленням за акустикою [3].

Shahed-136 вирізняється серед усіх аналізованих типів БПЛА. Він має найнижчі частоти (75–100 Гц) і найвищу абсолютну потужність акустичного сигналу, що формує найбільший запас SNR для системи виявлення [4, 5]. Водночас запропонований підхід є перспективним і для інших типів БПЛА завдяки універсальності архітектури сенсорного злиття.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія дослідження базується на комплексному аналізі пасивних фізичних полів Shahed-136, а саме: акустичного та теплового, та на теоретичному обґрунтуванні можливості створення комбінованої системи донаведення.

Акустичне поле Shahed-136 формується двигуном MD-550 та дволопатевою гвинтом фіксованого кроку. Двигун MD-550 – це іранська копія німецького Limbach L550E та являє собою чотирьохциліндровий двотактний двигун об'ємом 550 см³. Особливістю двотактного циклу є те, що кожен циліндр здійснює робочий хід при кожному оберті вала, що суттєво впливає на спектральний склад акустичного поля порівняно з чотиритактними двигунами.

Акустичний спектр Shahed-136 є детермінованим і утворений набором дискретних гармонік, зумовлених трьома незалежними фізичними механізмами.

Фундаментальна частота обертання вала $f_0 \approx 75 - 100$ Гц (позначається також f_{shaft}). Під час польоту БПЛА на крейсерській швидкості, оберти двигуна становлять 4500–6000 об/хв., що відповідає $f_0 = 75 - 100$ Гц. Це основний тон акустичного сигналу.

Другий механізм – це прохід лопатей гвинта (Blade Pass Frequency, BPF): $f_2 = 2f_0$ (для дволопатевого гвинта). При $f_0 = 100$ Гц дає домінуючий пік на 200 Гц.

Третій механізм – це робочі такти двигуна (firing frequency): $f_4 = 4f_0$ (для чотирьохциліндрового двотактного двигуна відбуваються чотири вибухи за один оберт вала). При $f_0 = 100$ Гц формує потужний пік на 400 Гц.

Таким чином, акустичний портрет Shahed-136 можливо описати рядом дискретних гармонік

$$f_i = i \cdot f_0, \quad (1)$$

Закінчення табл. 1а

де $i = 1, 2, 3, \dots$ – це обертони акустичного поля, $f_0 \approx 75\text{--}100$ Гц – це фундаментальна частота.

При крейсерських 6000 об/хв. структура спектра набуває такого вигляду: $f_1 \approx 100$ Гц (вал), $f_2 \approx 200$ Гц (ВРФ, гвинт), $f_4 \approx 400$ Гц (найбільш виражена), $f_6 \approx 600$ Гц, $f_8 \approx 800$ Гц і так далі до 10–12 значущих гармонік у діапазоні до 1,5–2 кГц. При цьому найбільша енергія акустичного випромінювання зосереджена у першій декаді гармонік [4, 5]. Детектування акустичного спектру БПЛА можливо з використанням чутливих мікрофонних сенсорів, для яких критичним параметром є співвідношення сигнал/шум SNR на низьких частотах, де власний та фоновий шум навколишнього середовища є найбільш відчутними.

Для реєстрації акустичних сигналів БПЛА пропонується використовувати мікрофонний масив з 4–8 елементів на базі MEMS мікрофона Infineon IM73A135 (табл. 1а).

Таблиця 1а. Ключові параметри MEMS-мікрофона Infineon IM73A135V01 (таблиця сформована автором за даташитом)

Параметр	При повному живленні	При низькому живленні
Співвідношення сигнал/шум	73 дБ	71 дБ
Акустична точка переваження	135 дБ	130 дБ
Струм споживання	170–230 мкА	70–80 мкА
Напруга живлення	2,3–3,0 В	1,52–1,8 В
Власний шум	21 дБ	23 дБ

Параметр	При повному живленні	При низькому живленні
Допуск чутливості (після калібрування)	±1 дБ	
Захист від води та пилу	IP57	
Час запуску	10–30 мс	
Габарити корпусу	4 × 3 × 1,2 мм	

Мікрофон має SNR 73 дБ, де ефективний SNR на частоті 100 Гц оцінюється на рівні 68–70 дБ внаслідок спектрального нахилу 1/f-шуму завдяки технології Sealed Dual Membrane, що мінімізує вплив шуму (1/f noise) [6]. Власний шум мікрофона становить 21 дБ. Точка акустичного переваження становить 135 дБ в режимі «Повне живлення» і 130 дБ в режимі «Низьке живлення», що виключає тимчасову фіксацію сенсора в умовах інтенсивного акустичного впливу від власних гвинтів дрона-перехоплювача. Мікрофон відповідає класу захисту IP57 на рівні компонента, що суттєво підвищує надійність системи в умовах атмосферних опадів. Завдяки всеспрямованій діаграмі спрямованості IM73A135 чутливий до звуку з будь-якого боку без необхідності точного наведення на ціль, що є ідеальним для систем акустичного моніторингу. Також слід зазначити що мікрофон є омнідирекційним, тому всі криві залишаються майже круглими. Відхилення від ідеального кола зростає з частотою через акустичну тінь малого корпусу (4×3×1,2 мм) (рис. 1).

Рівень звукового тиску $J_p(r)$ дБ, що створюється Shahed-136 на відстані r від мікрофона, можна визначити за допомогою наступної емпіричної залежності, враховуючи [20]:

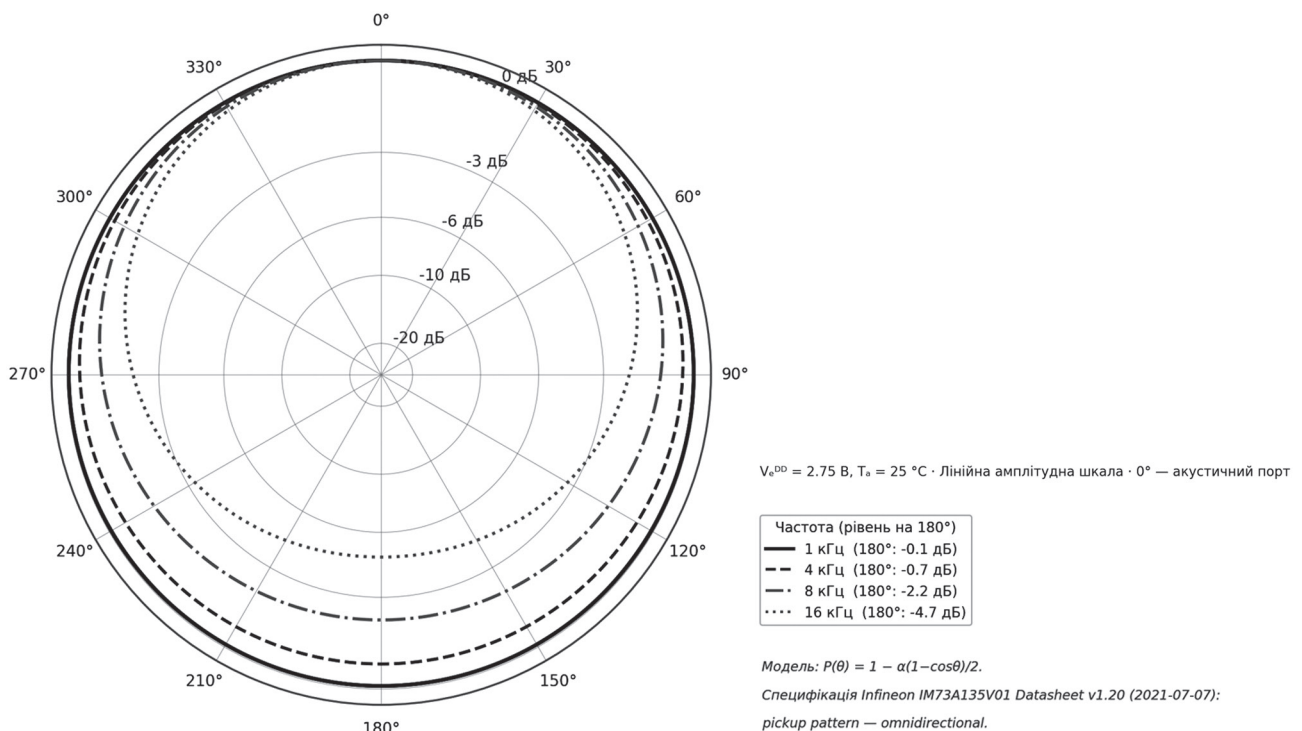


Рис. 1. Діаграма спрямованості MEMS мікрофона Infineon IM73A135

Зроблена автором згідно даташиту мікрофона Infineon IM73A135

$$J_p(r) = J_{p0} - 20 \lg \frac{r}{r_0} - \alpha(f)r, \quad (2)$$

де J_{p0} – рівень звукового тиску на еталонній відстані $r_0 = 1$ м (для Shahed-136 прийнято авторами 105–110 дБ на 100 Гц, що підтверджується даними [4, 5]); $20 \lg \frac{r}{r_0}$ – характеризує втрати на сферичне розсіювання; $\alpha(f)$ – коефіцієнт атмосферного поглинання звуку (дБ/м). Для частоти 100 Гц за стандартних умов (температура повітря 20 °С, відносна вологість 70 %) $\alpha \approx 0,0015\text{--}0,003$ дБ/м [ISO 9613-1:1993].

Результуюче SNR на вході мікрофона:

$$SNR = J_p(r) - J_{\text{noise}}, \quad (3)$$

де J_{noise} – еквівалентний рівень власного шуму мікрофона на робочій частоті ≈ 21 дБ для IM73A135.

За прийнятими значеннями $J_{p0} = 108$ дБ та $\alpha = 0,002$ дБ/м отримані результати зведено до табл. 16.

Т а б л и ц я 16. Розрахунковий SNR мікрофона IM73A135 для акустичної сигнатури Shahed-136

Відстань	J_p , дБ	SNR, дБ	Оцінка
500 м	53	32	Дуже добрий запас
1 км	46	25	Прийнятний для надійного виявлення
2 км	38	17	Достатній для згорткової нейронної мережі після фільтрації
3 км	Приблизно 30	10–12	Межа надійного виявлення

Таким чином, мікрофон IM73A135 забезпечує запас SNR понад 15–20 дБ на дистанціях до 2–2,5 км навіть з урахуванням атмосферного поглинання та шуму. Лімітуючим фактором на великих відстанях є зовнішній фоновий шум навколишнього середовища, а не власний шум мікрофона. Вибір IM73A135 дозволяє реалізувати надійне дальнє пеленгування Shahed-136 на дистанціях до 3–5 км над сушею та до 5–7 км над морем.

Практичну підтвердженість розрахункового підходу демонструють натурні дослідження [5]: дослідний макет на базі мікрофонної решітки надійно виявляє БПЛА типу Фурія ($f_0 = 1068$ Гц, крок гармонік 356 Гц) на відстані до 500 м, а БПЛА типу Лелека 10 ($f_0 = 1985$ Гц, крок 331 Гц) аналогічно, за умови наявності щонайменше трьох кратних гармонік у прийнятому спектрі. Shahed-136 з MD-550 забезпечує значно нижчу фундаментальну частоту (приблизно 100 Гц) і вищу абсолютну потужність акустичного випромінювання, що формує суттєво більший запас SNR на аналогічних дистанціях.

Однією з ключових проблем при реалізації акустичного каналу є високий рівень власного шуму пропелерів і двигунів дрона-перехоплювача, який може перевищувати рівень корисного сигналу від цілі в умовах низького SNR на дистанціях порядку десятків метрів. Для подолання цього обмеження пропонується дворівнева стратегія подавлення.

На першому рівні мікрофони IM73A135 розміщуються на виносних штангах довжиною 15–25 см відносно площини пропелерів. Таке рішення знижує рівень власного шуму на 6–12 дБ завдяки закону зворотних квадратів. На другому рівні алгоритми Least Mean Squares, LMS (метод найменших середніх квадратів) або Recursive Least Squares, RLS (рекурсивний метод найменших квадратів) із референтним сигналом з польотного контролера (оберти двигунів, RPM) або з додаткового мікрофона, спрямованого безпосередньо на власні двигуни. Адаптивний фільтр динамічно віднімає домінуючі гармоніки власного шуму в реальному часі, підтримуючи прийнятне SNR навіть під час інтенсивного маневрування.

Комбінування фізичної десоціації та адаптивної фільтрації є ключовим елементом дослідження, що забезпечує працездатність акустичного каналу в реальних умовах польоту. На подальших етапах планується моделювання та експериментальна перевірка ефективності запропонованих методів подавлення шуму.

Двигун Shahed-136 створює теплове випромінювання з температурою 300–500 °С. Однак реальний тепловий контраст цілі є відносно низьким: вихлопна система частково маскується конструкцією планера, а мала потужність двигуна MD-550 (особливо на крейсерській швидкості) обмежує загальне теплове випромінювання. Через це надійне виявлення за тепловою сигнатурою можливе переважно на заключній стадії зближення, коли кутовий розмір гарячої плями двигуна стає достатнім для LWIR-сенсора.

Додатковим обмежувальним чинником є явище трати теплового контрасту в певні моменти доби, переважно на світанку та у сутінки, температурний контраст між об'єктом та підстильною поверхнею наближається до нуля. Це робить неохолоджені болометри тимчасово неефективними, що додатково обґрунтовує необхідність резервного акустичного каналу.

Для реалізації тепловізійного каналу пропонуються неохолоджені LWIR-сенсори з параметрами NETD до 25 мК та роздільною здатністю 640×512 пікселів, аналогічні тим, що застосовані у FPV-перехоплювачах типу STING та ін. [16]. При досягненні дистанції менше 500 м двигун Shahed-136 забезпечує тепловий контраст понад 5–10 К відносно холодного неба, що є достатнім для надійного відстеження центра маси плями з точністю до 2 пікселів.

Через обмежений тепловий контраст цілі наявність резервного шляху донаведення є обов'язковою: у разі втрати або недостатності теплового сигналу система автоматично повертається до акустичного каналу. Процес донаведення реалізується у вигляді кінцевого автомата (Finite State Machine, FSM), який забезпечує динамічне перемикання між акустичним і тепловізійним каналами залежно від поточного. Такий підхід дозволяє оптимально поєднати дальність акустичного виявлення з точністю тепловізійного трекінгу. Логіка FSM включає три основні стани та резервний.

Перший стан – це акустичний пошук (дальня фаза, дистанція до цілі понад 2 км). Після виходу в район цілі, за даними зовнішньої мережі ППО або GPS-наве-

дення, мікрофонний масив є єдиним активним каналом. В цьому випадку мікрофони IM73A135 функціонують у режимі низького живлення, а тепловізор перебуває в режимі очікування для економії енергії. При переході до активної фази необхідно враховувати час запуску мікрофона 10–30 мс після подачі напруги, а також час перемикання між режимами 10 мс невизначеного вихідного сигналу.

Перехід до другого стану здійснюється при виконанні умови:

$$SNR_{\text{acoustic}} > T_1, \quad (4)$$

де T_1 – поріг виявлення фундаментальної гармоніки MD-550 ($f_0 \approx 100$ Гц).

Другий стан – це гібридний режим (перехідна фаза, дистанція до цілі 500–2000 м). Акустичний канал надає грубий пеленг для звуження зони пошуку тепловізора. Перехід активується при одночасному виконанні двох критеріїв: виявлення теплової плями розміром більше 2×2 пікселів та температурний контраст $\Delta T > NETD \times 5$. Дані з обох каналів зливаються за зваженою схемою.

Третій стан – це термінальна фаза (дистанція до цілі менше 500 м). Система повністю переходить на тепловізійний канал, що є основним. Акустичний канал виконує відсікання хибних спрацювань. Перехід відбувається при перевищенні кутовим розміром теплової плями встановленого порогу.

Резервний режим. При втраті сигналу в будь-якому основному стані система автоматично повертається до попереднього стану або задіює Доплер корекцію з акустики. У випадку повної втрати акустичного сигналу можливо задіяти інерційний фільтр Калмана для повторного захоплення. Гістерезис 50 м запобігає частому перемикаю.

На подальших етапах дослідження планується детальне моделювання FSM у MATLAB та програмна реалізація на Raspberry Pi 5 або Jetson Orin Nano.

Пропонується дані з акустичного та тепловізійного каналів перетворювати на команди керування дроном-перехоплювачем через єдиний алгоритмічний ланцюг на бортовому комп'ютері (On Board Computer, OBC) типу Raspberry Pi 5 або Jetson Orin Nano.

Обчислювальні можливості стандартних польотних контролерів на базі мікроконтролерів STM32 та F7 під управлінням програмного забезпечення Betaflight або INAV є недостатніми для самостійної реалізації повного циклу алгоритмів донаведення в режимі реального часу. Це обмеження зумовлене тим, що такі контролери ефективно працюють лише з PID-регуляторами та стабілізацією, тоді як обробка складних спектрограм нейронних мереж та фільтрів Калмана вимагає окремого бортового комп'ютера (OBC). Тому перехоплювач обов'язково дообладнується окремим OBC. Після виконання всього обчислювального циклу OBC передає польотному контролеру готові команди прискорення. Для забезпечення стійкої роботи контуру пропорційної навігації критично важливо підтримувати затримку циклу керування на рівні, що не перевищує 20 мс.

Основним методом наведення є класична пропорційна навігація (Proportional Navigation, PN), в основі якої є прогнозування точки зустрічі з ціллю.

Принцип PN полягає в зведенні до нуля кутової швидкості лінії візування λ . Командне прискорення обирається перпендикулярно лінії візування наступним чином:

$$a_c = N \cdot V_c \cdot \dot{\lambda}, \quad (5)$$

де a_c – командне прискорення; N – навігаційна константа, за якою обирається точка зустрічі (оптимально 3,5–4,5; при $N < 3$ рух навздогін, при $N > 5$ – рух на випередження); V_c – швидкість зближення (визначається з доплерівської складової акустичного сигналу); $\dot{\lambda}$ – кутова швидкість лінії візування після фільтра Калмана 2-го порядку:

$$\dot{\lambda} = \frac{d}{dt} \left[\text{atan2}(y_c - y_p, x_c - x_p) \right], \quad (6)$$

де (x_c, y_c) – координати цілі; (x_p, y_p) – координати перехоплювача.

Shahed-136 летить майже прямолінійно зі сталою швидкістю 150–180 км/год. При $N = 4$ перехоплювач витрачає мінімальне прискорення (до 2–3 g), що є ідеальним для 7-дюймового FPV з обмеженим ресурсом акумулятора. Алгоритм PN виконується на OBC кожні 10 мс за чотирма кроками:

1. отримання поточних координат цілі з модуля сенсорного злиття (в прямокутній інерційній пов'язаній з перехоплювачем системі координат);
2. розрахунок $\dot{\lambda}$ і V_c ;
3. обчислення a_c та розкладання на команди roll/pitch/yaw rate;
4. передача на польотний контролер по MAVLink або MSP.

На дальній фазі мікрофонний масив IM73A135 формує 8-канальний аудіопотік, який після попередньої обробки перетворюється на мел-спектрограми. CNN за 5–8 мс видає азимут і кут місця цілі з точністю $\pm 3^\circ$. Паралельно прораховується Доплерівська складова акустичного сигналу для розрахунку відносної швидкості. Тепловізор знаходиться в режимі очікування.

На перехідній фазі азимут з акустики (θ_a) та тепловий центр маси (θ_t) об'єднуються за зваженим середнім значенням:

$$\theta_{\text{fused}} = w_a \cdot \theta_a + w_t \cdot \theta_t, \quad (7)$$

де ваги перераховуються кожні 10 мс:

$$w_a = \frac{SNR_a}{SNR_a + \text{contrast}_t}, w_t = 1 - w_a. \quad (8)$$

При SNR акустики понад 10 дБ і тепловому контрасті більше 1,5 К ваги приблизно рівні. Фільтр Кальмана об'єднує обидва джерела, забезпечуючи плавний перехід і стійкість до часткової втрати одного каналу. Пропорційна навігація працює вже на об'єднаних координатах. Такий підхід відповідає рівню сенсорного злиття, запропонованому в роботі [28]. На термінальній фазі LWIR сенсор фіксує гарячу пляму двигуна з тепловим контрастом 5–10 К. Алгоритм відстежує центр маси плями з точністю до 2 пікселів. Акустичний канал переходить у режим резервного підтвердження та відсікання теплових завад.

Резервний режим. При повній втраті сигналу система повертається до Доплерівської корекції акустичного сигналу або переходить на інерційний фільтр Калмана

до повторного захоплення. Гістерезис 50 м запобігає частому перемиканню.

ВИСНОВКИ

У роботі, яка є першим етапом розробки загальної методики доведення дронів-перехоплювачів за фізичними полями ударних БПЛА противника, теоретично обґрунтовано концепцію комбінованої акустико-тепловізійної системи донаведення. Отримано такі основні результати.

Обґрунтовано вибір MEMS-мікрофона Infineon IM73A135 як оптимального сенсора акустичного каналу, де розрахунковий SNR перевищує 25 дБ на відстані 1 км та 17 дБ на відстані 2 км, що забезпечує надійне захоплення цілі задовго до введення тепловізійного каналу. Лімітуючим фактором є зовнішній фоновий шум середовища, а не власний шум мікрофона (21 дБ).

Розроблено концепцію трифазового кінцевого автомата (FSM) з резервним режимом, що забезпечує плавне та адаптивне перемикання між акустичним, гібридним і тепловізійним режимами. Обидва канали взаємно компенсують слабкі сторони один одного, акустика за низькою тепловою сигнатурою, тепловізор за шумом у міській забудові.

Теоретично обґрунтовано перевагу пропорційної навігації (PN, $N = 4$) над чистим наведенням, де очікуване зростання ймовірності перехоплення на 25–30 % та зменшення енерговитрат на 40 %, що є критичним для 7-дюймового FPV з обмеженим джерелом живлення. Верифікація оцінки запланована в MATLAB на наступному етапі дослідження.

Сформовано прогнозовані характеристики системи на основі аналітичних розрахунків та даних літератури, де очікувана ймовірність захоплення становить приблизно 82 % на дистанціях 2–4 км, акустична дальність первинного захоплення 3,2 км (суша) та 5,8 км (море), стійкість до РЕБ на рівні приблизно 95 % завдяки повній пасивності. Усі показники підлягають верифікації в MATLAB та натурних випробуваннях.

Ідентифіковано ключові технічні обмеження, такі як: субхвильова апертура масиву на частоті 100 Гц, ризик хибних спрацювань у цивільному акустичному середовищі та явище втрати теплового контрасту. Подолання цих обмежень вимагає мультимодальної верифікації цілі та адаптивної ваги каналів у FSM.

В подальших дослідженнях передбачається проведення комплексного математичного моделювання в середовищі MATLAB для верифікації розрахункових характеристик системи, зокрема ймовірності захоплення цілі, переваг пропорційної навігації над методом чистого наведення, а також ефективності адаптивної фільтрації шуму та алгоритму FSM. Наступним етапом є апаратна реалізація запропонованих рішень на базі програмованої логічної інтегральної схеми (FPGA) та на комп'ютері, який розміщений на одному маленькому чіпі (SoC), що включає розробку обчислювального блоку для паралельної обробки восьми аудіоканалів та відеопотоку від LWIR-сенсора. У межах цієї архітектури планується впровадження адаптивного фільтра Калмана зі змінними вагами, здатного автоматично підвищува-

ти пріоритет акустичного пеленгатора за умов низької достовірності даних тепловізійного каналу. Крім того, передбачається формування бібліотеки цифрових відбитків Shahed-136 шляхом систематичного накопичення акустичних і теплових сигнатур цілі у різних режимах польоту та атмосферних умовах, що забезпечить базу для навчання алгоритмів штучного інтелекту та систем машинного зору.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Сокольський С. О. Акустичне виявлення безпілотних літальних апаратів : дис. ... д-ра філос. : 172. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2023. 183 с.
2. Атаманчук А. В. Метод виявлення та ідентифікації БПЛА з застосуванням нейронної мережі : кваліф. робота магістра : 172. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя. 2022. 89 с.
3. Тютюнник В. А. та ін. Акустичний метод ідентифікації застосування БПЛА як джерел надзвичайних ситуацій. *Social Development and Security*. 2025. Т. 15. № 1. С. 300—310. DOI: 10.33445/sds.2025.15.1.26.
4. Даник Ю. Г., Пулеко І. В., Бугайов М. В. Виявлення БПЛА на основі аналізу акустичних та радіолокаційних сигналів. *Вісн. ЖДТУ*. 2014. № 4(71). С. 71—80.
5. Чигінь В. І. та ін. Вдосконалення способу виявлення БПЛА за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. *Військ.-техн. зб.* 2019. № 20. С. 58—63. DOI: 10.33577/2312-4458.20.2019.58-63.
6. Infineon Technologies AG. IM73A135 Data Sheet: High SNR Microphones with Sealed Dual Membrane Technology. Rev. 1.20. Munich. 2021. 32 p.
7. Infineon Technologies AG. IM69D130 Data Sheet. Rev. 1.00. Munich. 2017. 28 p.
8. Бугайов М. В. Аналіз ефективності виявлення тактичних БПЛА пасивними та активними засобами спостереження. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. Житомир. 2015. Вип. 10. С. 5—19.
9. Saravanakumar, A. & Senthilkumar, K. (2014). Exploitation of acoustic signature of low flying aircraft using acoustic vector sensor. *Defence Science J.* Vol. 64. No. 2. Pp. 95—98.
10. Pham, T. & Srour, N. (2004). TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs. *Proc. SPIE*. Vol. 5417. Pp. 24—29.
11. DroneShield. Acoustic Detection Technology White Paper. Sydney. 2024.
12. Єрмоєнко О. О., Бабич А. П., Поплавець С. І. Удосконалення системи ППО поля бою в умовах застосування FPV-дронів. Системи обробки інформації. 2025. Вип. 4(183). С. 29—36.
13. Melnyk, O. et al. Contemporary Methods of Countering Unmanned Systems: Technologies and Prospects. *Судноводіння*. 2024. № 36. С. 102—115. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.102-115.
14. Чигінь В. І. Акустичні методи виявлення малорозмірних повітряних цілей : монографія. Львів : НАСВ. 2020. 148 с.
15. Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*. Prentice Hall. 560 p.

16. IEEE Std 1451.5-2007. Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators. New York : IEEE. 2007.
17. Bar-Shalom, Y., Li, X., R. & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Wiley. 552 p.
18. Blackman, S. & Popoli, R. (1999). Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House. 1230 p.
19. Infineon Technologies. Application Note: Microphone Array Beamforming with IM73A135. 2022.
20. MATLAB & Simulink Documentation. Sensor Fusion and Tracking Toolbox. MathWorks. 2025.
21. ISO 9613-1:1993. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors. P. 1. Geneva : ISO. 1993. 21 p.
22. Дзеверін І. Г. та ін. Математичне моделювання ефективності бойового застосування підрозділів БпЛА винищувачів (перехоплювачів) при спільних діях. Системи озброєння і військова техніка. 2025. № 3(83). С. 39—46. DOI: 10.30748/soivt.2025.83.05.
23. Evdokimenkov, V. N., Kozorez, D. A. & Rabinskiy, L. N. (2021). Unmanned aerial vehicle evasion manoeuvres from enemy aircraft attack. J. of the Mechanical Behavior of Materials. Vol. 30. Pp. 87—94. DOI: 10.1515/jmbm-2021-0009.
24. TensorFlow Lite Documentation for Audio Classification. Google. 2025.
25. Microflown Avisa. Acoustic Vector Sensors for UAV Detection. Arnhem. 2023.
26. Król M. et al. (2017). SAN: An Integrated Unmanned Air Vehicles Interdictor System Concept. Problems of Mechatronics. Vol. 8. No. 4(30). Pp. 79—94. DOI:10.5604/01.3001.0010.7319.
27. Goodrich, W. (2019). Systems and Methods Countering an Unmanned Air Vehicle : pat. US 10,399,674 B2. Sep. 3.
28. Nyzhnyk, A. O. & Partyka, A. I. (2025). Development of the Concept of a UAV Detection and Neutralization System Using Interceptor Drones. Computer Systems and Networks. Vol. 7. No. 1. Pp. 235—246. DOI: 10.23939/csn2025.01.235.
29. Тютюник В. А. Автоматизовані системи моніторингу надзвичайних ситуацій з використанням акустичних сенсорів : дис. ... д-ра техн. наук. Харків. 2024.
30. ta radiolokatsionykh syhnaliv” [UAV detection based on acoustic and radar signal analysis]. Visn. ZhDTU. No. 4(71). Pp. 71—80 [in Ukrainian].
31. Chyhin, V. I. et al. (2019). “Vdoskonalennia sposobu vyivlennia BPLA za rezultatamy spektralnoho analizu akustychnykh syhnaliv” [Improving UAV detection using spectral analysis of acoustic signals]. Viisk.-tekh. Zb. No. 20. Pp. 58—63. DOI: 10.33577/2312-4458.20.2019.58-63.
32. Infineon Technologies AG. IM73A135 Data Sheet: High SNR Microphones with Sealed Dual Membrane Technology. Rev. 1.20. Munich. 2021. 32 p.
33. Infineon Technologies AG. IM69D130 Data Sheet. Rev. 1.00. Munich. 2017. 28 p.
34. Buhaiov, M. V. (2015). “Analiz efektyvnosti vyivlennia taktychnykh BPLA pasyvnymy ta aktyvnymy zasobamy” [Analysis of tactical UAV detection effectiveness by passive and active means]. Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiynykh system. Zhytomyr. Iss. 10. Pp. 5—19 [in Ukrainian].
35. Saravanakumar, A. & Senthilkumar, K. (2014). Exploitation of acoustic signature of low flying aircraft using acoustic vector sensor. Defence Science J. Vol. 64. No. 2. Pp. 95—98.
36. Pham, T. & Srour, N. (2004). TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs. Proc. SPIE. Vol. 5417. Pp. 24—29.
37. DroneShield. Acoustic Detection Technology White Paper. Sydney. 2024.
38. Yeromenko, O. O., Babych, A. P. & Poplavets, S. I. (2025). “Udoskonalennia systemy PPO polia boiu v umovakh zastosuvannia FPV-droniv” [Improving the battlefield air defense system under FPV drone use]. Systemy obrobky informatsii. Iss. 4(183). Pp. 29—36.
39. Melnyk, O. et al. (2024). Contemporary Methods of Countering Unmanned Systems: Technologies and Prospects. Sudnovodinnia. No. 36. Pp. 102—115. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.102-115.
40. Chyhin, V. I. (2020). “Akustychni metody vyivlennia malorozmnykh povitrianykh tsilei” [Acoustic methods for detecting small aerial targets]: monohrafiia. Lviv : NASV. 148 p. [in Ukrainian].
41. Kay, S. M. (1998). Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory. Prentice Hall. 560 p.
42. IEEE Std 1451.5-2007. Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators. New York : IEEE. 2007.
43. Bar-Shalom, Y., Li, X., R. & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with Applications to Tracking and Navigation. Wiley. 552 p.
44. Blackman, S. & Popoli, R. (1999). Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House. 1230 p.
45. Infineon Technologies. Application Note: Microphone Array Beamforming with IM73A135. 2022.
46. MATLAB & Simulink Documentation. Sensor Fusion and Tracking Toolbox. MathWorks. 2025.
47. ISO 9613-1:1993. Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors. P. 1. Geneva : ISO. 1993. 21 p.
48. Dzeverin, I. H. et al. (2025). “Matematychno modeliuвання efektyvnosti boiovoho zastosuvannia pidrozdiliv BpLA vynyshchuvachiv (perekhoptiuvachiv) pry spilnykh

REFERENCES

1. Sokolskyi, S. O. (2023). “Akustyчне vyivlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ” [Acoustic detection of unmanned aerial vehicles]. Dys. d-ra filos. : 172. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. 183 p. [in Ukrainian].
2. Atamanchuk, A. V. (2022). “Metod vyivlennia ta identyfikatsii BPLA z zastosuvanniam neironnoi merezhi” [UAV detection and identification method using a neural network]. Kvalif. robota mahistera. Ternopil : TNTU im. I. Puliuiua. 89 p. [in Ukrainian].
3. Tiutiunyk, V. A. et al. (2025). “Akustychnyi metod identyfikatsii zastosuvannia BPLA yak dzherel nadzvychainykh sytuatsii” [Acoustic method for UAV identification as sources of emergencies]. Social Development and Security. Vol. 15. No. 1. Pp. 300—310. DOI: 10.33445/sds.2025.15.1.26.
4. Danyk, Yu. H., Puleko, I. V. & Buhaiov, M. V. (2014). “Vyivlennia BPLA na osnovi analizu akustychnykh

- diiakh” [Mathematical modeling of combat effectiveness of UAV interceptor units in joint operations]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, No. 3(83). Pp. 39—46. DOI: 10.30748/soivt.2025.83.05.
23. Evdokimenkov, V. N., Kozorez, D. A. & Rabinskiy, L. N. (2021). Unmanned aerial vehicle evasion manoeuvres from enemy aircraft attack. *J. of the Mechanical Behavior of Materials*. Vol. 30. Pp. 87—94. DOI: 10.1515/jmbm-2021-0009.
24. TensorFlow Lite Documentation for Audio Classification. Google. 2025.
25. Microflown Avisa. Acoustic Vector Sensors for UAV Detection. Arnhem. 2023.
26. Król, M. et al. (2017). SAN: An Integrated Unmanned Air Vehicles Interdictor System Concept. *Problems of Mechatronics*. Vol. 8. No. 4(30). Pp. 79—94. DOI:10.5604/01.3001.0010.7319.
27. Goodrich, W. (2019). Systems and Methods Countering an Unmanned Air Vehicle : pat. US 10,399,674 B2. Sep. 3.
28. Nyzhnyk, A. O. & Partyka, A. I. (2025). Development of the Concept of a UAV Detection and Neutralization System Using Interceptor Drones. *Computer Systems and Networks*. Vol. 7. No. 1. Pp. 235—246. DOI: 10.23939/csn2025.01.235.
29. Tiutiunnyk, V. A. (2024). “Avtomatyzovani systemy monitorynhu nadzvychainykh sytuatsii z vykorystanniam akustychnykh sensoriv” [Automated emergency monitoring systems using acoustic sensors]: dys. ... d-ra tekhn. nauk. Kharkiv [in Ukrainian].

Tryhub V.S., Bilan I.A.

COMBINED ACOUSTIC-THERMAL TERMINAL GUIDANCE OF AUTONOMOUS INTERCEPTOR DRONES AGAINST LOW-SPEED AIR TARGETS OF THE SHAHED-136 TYPE

This article addresses the critical vulnerability of traditional air defense systems to mass-produced, low-speed kamikaze UAVs like the Shahed-136 (Geran-2). These targets operate at low altitudes (50–150 m) and have minimal radar signatures (RCS < 0.1 m²), making them difficult and expensive to intercept with standard missile systems. The research provides the first stage of a general methodology for guiding interceptor drones via passive physical fields, focusing on a fully passive, low-cost, and EW-resistant solution. The methodology involves a comprehensive analysis of the target’s acoustic and thermal signatures. The acoustic field of the Shahed-136’s MD-550 engine is characterized by a deterministic spectral structure, including the shaft frequency 75–100 Hz, blade passing frequency (BPF), and cylinder firing frequency. For reliable detection, Infineon IM73A135 MEMS microphones are selected due to their high signal-to-noise ratio (SNR), providing a calculated margin of over 25 dB at a range of 1 km. The thermal channel utilizes uncooled Long Wave Infrared (LWIR) sensors with a sensitivity (NETD) of 25 mK to track the heat signature of the engine at

distances under 500 m. A key scientific novelty of this work is the formally specified three-phase Finite State Machine (FSM) architecture. This system dynamically manages the transition between three states: acoustic search (long-range), hybrid tracking (mid-range), and LWIR-based thermal homing (terminal phase). Adaptive weighting algorithms for sensor fusion are proposed to ensure stability during «thermal crossover» periods or in high-noise environments. Furthermore, the study substantiates the use of Proportional Navigation (PN) with a constant $N=4$. Analytical calculations confirm that this approach reduces energy consumption by 40 % while increasing interception probability compared to pure pursuit methods. For a standard 7-inch FPV interceptor, the required commanded acceleration remains within a physically achievable limit of 2.4 g. The projected results indicate an 82 % probability of target acquisition at distances of 2–4 km and a high resistance to electronic warfare (approximately 95 %) due to the system’s complete passivity. This research provides a foundational framework for cost-effective, non-kinetic additions to layered air defense systems, particularly effective against GNSS-independent autonomous platforms.

Keywords: *interceptor drones, acoustic detection, thermal homing, Shahed-136, proportional navigation, sensor fusion, harmonic analysis, convolutional neural network, finite state machine, self-noise suppression, electronic warfare resistance.*

Відомості про авторів:

Тригуб Владислав Сергійович

Інститут Військово-Морських Сил
Національний університет
«Одеська морська академія»
м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0005-2142-8780>

Білан Ірина Анатоліївна

Український науково-дослідний інститут спеціальної
техніки та судових експертиз
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>

Information about the authors:

Tryhub Vladyslav

Institute of Naval Forces
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-2142-8780>

Bilan Iryna

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and
Forensic Expertise
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>

Стаття надійшла до редколегії 07.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 355.02+004.91

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).67-74](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).67-74)**Е. Г. ЛЮТФАЛІЄВ**, аспірант<https://orcid.org/0009-0009-9070-6632>*(Інститут прикладного системного аналізу
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ)*

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІТРУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

У статті проаналізовано вплив вітру на дієвість алгоритмів побудови траєкторій безпілотних літальних апаратів літакового типу. Проведено огляд актуальних способів компенсації зовнішніх чинників, зокрема вітру, із застосуванням адаптивних та оптимізаційних технік. Створено математичні моделі впливу вітру на динаміку польоту БПЛА. Докладно викладено методи компенсації з PID-регуляторами, фільтр Калмана та моделі передбачення на основі машинного навчання. Проведено обчислення та розрахунки щодо відхилення БПЛА від траєкторії. Схематичні зображення наочно демонструють траєкторію БПЛА у вітровому полі та результативність методів компенсації. Надано практичні поради щодо впровадження компенсації вітру у існуючі системи управління БПЛА та окреслено можливості подальших досліджень у напрямку створення гібридних методів компенсації та їх подальша інтеграція у бортові контролери.

Ключові слова: БПЛА, компенсація вітру, планування траєкторії, PID-регулятор, фільтр Калмана, машинне навчання, енергоспоживання, моделювання.

ВСТУП

Використання безпілотних літальних апаратів літакового типу (fixed-wing UAV) у цивільних, військових, промислових та наукових сферах стрімко зростає. Однією з ключових проблем залишається забезпечення точності та безпеки польоту в умовах впливу зовнішніх факторів, зокрема вітру. Вітер може суттєво змінювати траєкторію руху БПЛА, збільшувати його енергоспоживання та знижувати ефективність виконання задач. Саме тому розробка алгоритмів, які здатні компенсувати вплив вітру, є актуальним завданням сучасної науки та техніки [1–6].

Метою статті є комплексний аналіз впливу вітру на ефективність алгоритмів побудови траєкторій безпілотних літальних апаратів, а також обґрунтування з математичної точки зору сучасних методів компенсації впливу вітру на рух БПЛА, розробка та їх експериментальна перевірка. Особлива увага приділена підвищенню точності, енергетичної ефективності та безпеки польоту БПЛА шляхом впровадження адаптивних і оптимізаційних підходів до планування траєкторій та управління польотом у складних умовах впливу вітру на рух БПЛА.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

За останні роки у науковому просторі з'явилась низка сучасних підходів до планування траєкторій БПЛА з урахуванням впливу вітру на його траєкторію. Зокрема, у роботі Н. Haghighi та співавторів [1] розглянуто оптимізацію траєкторії для максимального паріння у вітряних умовах. Х. Dai та співавтори [2] запропонували енергоефективний підхід до планування траєкторії для БПЛА з урахуванням тривимірного моделювання впливу вітру, а Y. Zhang, J. Lyu та L. Fu [6] запропонували методи для збору даних у морському середовищі. Н. М. Р. С. Jayaweera та S. Hanoun [3] дослідили планування траєкторії БПЛА в умовах сильного вітру, а F. Lian та співавтори [4] і Н. Pu та співавтори [5] розробили енергосвідомі та гібридні алгоритми для динамічних і сильних вітрових полів. Українські дослідники також мають наукові дослідження у цій області: Л. М. Рижков і К. В. Пономаренко [7] проаналізували вплив вітру на точність наведення БПЛА, а Р. В. Куліш [12] запропонував модель урахування бічного вітру при плануванні маршрутів БПЛА. Важливий внесок у розуміння впливу складних і змінних вітрових полів на стабільний рух БПЛА під час польоту зробили А. Chakrabarty і J. Langelan [9], а також J. Liu та співавтори [11], які дослідили екстремальні вітрові умови у міському середовищі. Особлива увага сучасних наукових досліджень приділена методам компенсації зовнішніх факторів: PID-регуляторам, фільтрам Калмана, а також алгоритмам на основі машинного навчання, для прогнозування та корекції траєкторії БПЛА під час руху на траєкторії [3–5, 13–15]. Проведений аналіз наукових літературних джерел свідчить про зростання уваги наукової спільноти до нових розробок адаптивних, енергоефективних та інтелектуальних алгоритмів планування траєкторій БПЛА для експлуатації у складних вітрових умовах.

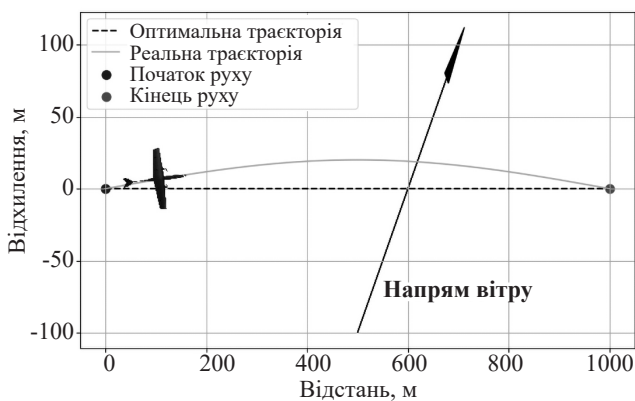
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основою для моделювання траєкторії БПЛА літакового типу у вітровому полі є аналіз сучасних досліджень у цій галузі. На динаміку польоту БПЛА впливають не тільки основні характеристики БПЛА, такі як маса, площа крила, крейсерська швидкість, довжина маршруту і початкова висота БПЛА, а й основні характеристики вітру – середня швидкість і напрямок вітру відносно маршруту руху БПЛА [1, 4]. При цьому, для правильного відтворення реальних умов необхідно враховувати не лише постійний вітер, а й пориви, які можуть суттєво впливати на відхилення БПЛА від заданої траєкторії та його енергоспо-

живання [3]. В наведеному експерименті буде розглянуто три типові сценарії руху БПЛА: відсутність вітру – коли вплив вітру на рух БПЛА відсутній, постійний вітер під заданим кутом до напрямку руху БПЛА та пориви вітру різної сили й напрямку. Такий підхід дає змогу оцінити ефективність алгоритмів компенсації впливу вітру на рух БПЛА у різних умовах, що відповідає рекомендаціям сучасних публікацій [5, 11]. Основні параметри, наведені в табл. 1, обрані на основі типових характеристик малих і середніх БПЛА літакового типу, які широко використовуються для задач спостереження, картографування та логістики [3, 11], наприклад Skywalker EVE-2000 або UAV Penguin B від UAV Factory Ltd.

Т а б л и ц я 1. Основні параметри БПЛА літакового типу та вітрового середовища

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Маса БПЛА	m	4,5	кг
Площа крила	S	0,9	м ²
Крейсерська швидкість	V_{cr}	18	м/с
Довжина маршруту	L	1000	м
Початкова висота	H_0	100	м
Середня сила вітру	V_{wind}	0 / 5 / 10 / 15	м/с
Кут вітру до маршруту	α	0 (зустрічний) / 45 / 90 (боковий)	градуси
Тривалість польоту	T	розраховується	с
Енергоспоживання	E	розраховується	Вт·год



Р и с. 1. Схема траєкторії БПЛА у вітровому полі

Математичне моделювання руху БПЛА у вітровому полі ґрунтується на класичних рівняннях механіки руху літальних апаратів у просторі з урахуванням зовнішніх збурень. Вектор швидкості літального апарата відносно землі визначається як сума векторів власної швидкості БПЛА (V) та швидкості вітру ($V_{вітер}$) [9]:

$$\vec{V}_{\text{БПЛА}} = \vec{V} + \vec{V}_{\text{вітер}}. \quad (1)$$

Це дає нам змогу моделювати як прямолінійний політ БПЛА у спокійну безвітрену погоду, так і складні траєкторії руху БПЛА у динамічних умовах зміни вітру. Вектор положення БПЛА r у момент часу t розраховується за формулою:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{V}_{\text{БПЛА}}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де \vec{r}_0 – початкове положення БПЛА, $\vec{V}_{\text{БПЛА}}(\tau)$ – швидкість БПЛА у момент часу τ .

Не менш важливим аспектом при розрахунках є розрахунок додаткових енергетичних витрат БПЛА на компенсацію вітру, що особливо актуально для тактичних завдань з обмеженим запасом енергії [2, 6]. Для визначення енергоспоживання БПЛА з урахуванням змінної сили та напрямку вітру застосуємо інтегральні залежності [4, 5]. Додаткові енергетичні витрати на компенсацію впливу вітру E_W :

$$E_W = \int_0^T P_W(t) dt, \quad (3)$$

де $P_W(t)$ – потужність, що витрачається на компенсацію вітру у момент часу t , T – загальний час польоту.

Загальне енергоспоживання E_{total} є сумою базового енергоспоживання БПЛА E_{base} і додаткового енергоспоживання через вплив вітру E_W :

$$E_{\text{total}} = E_{\text{base}} + E_W. \quad (4)$$

Потужність для компенсації впливу вітру $P_W(t)$:

$$P_W(t) = k \cdot |\vec{V}_W(t)|^3, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт аеродинамічних характеристик БПЛА, $|\vec{V}_W(t)|$ – модуль швидкості вітру у момент часу t .

Розраховуємо відхилення напрямку руху БПЛА від оптимальної траєкторії як середнє відхилення реальної траєкторії від оптимальної. Це дасть змогу кількісно оцінити ефективність різних алгоритмів компенсації впливу вітру на рух БПЛА [3, 7]:

$$\Delta d = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{r}_{\text{реальна}}(t) - \vec{r}_{\text{оптимальна}}(t)| dt, \quad (6)$$

де Δd – середнє відхилення від оптимальної траєкторії, T – час польоту, $\vec{r}_{\text{реальна}}(t)$ – положення БПЛА у момент часу t , $\vec{r}_{\text{оптимальна}}(t)$ – положення БПЛА на оптимальній траєкторії у момент часу t .

Такий підхід широко застосовується у сучасних дослідженнях для порівняння різних методів планування та управління польотом [4, 11].

Компенсація впливу вітру на траєкторію руху БПЛА є однією з ключових задач сучасної теорії управління. Серед найбільш поширених підходів вирішення цих задач є застосування PID-регуляторів, фільтра Калмана та методів прогнозування на основі машинного навчання. PID-регулятори дозволяють оперативну реагувати на відхилення від заданої траєкторії, забезпечуючи стабільність і точність польоту навіть у змінних умовах [3, 14]. Управляючий сигнал PID-регулятора розраховується за формулою:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал, $e(t)$ – відхилення від заданої траєкторії, K_p , K_i , K_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно.

Фільтр Калмана використовується для оцінки поточних параметрів вітру на основі даних, які надходять з датчиків БПЛА, що дозволяє адаптувати коригування напрямку руху БПЛА у реальному часі [7, 14].

Оцінка стану після корекції на кроці k :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H\hat{x}_{k|k-1}), \quad (8)$$

де $\hat{x}_{k|k-1}$ – прогнозована оцінка стану до корекції на кроці k , K_k – коефіцієнт Калмана на кроці k , z_k – виміряне значення на кроці k , H – матриця спостережень.

Коефіцієнт Калмана:

$$K_k = \frac{P_{k|k-1}H^T}{HP_{k|k-1}H^T + R}, \quad (9)$$

де $P_{k|k-1}$ – дисперсія оцінки стану до корекції на кроці k , H – матриця спостережень, R – дисперсія шуму вимірювань.

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q, \quad (10)$$

де $P_{k-1|k-1}$ – дисперсія оцінки стану після корекції на попередньому кроці $k-1$, Q – дисперсія процесу, що характеризує невизначеність моделі.

У сучасних наукових роботах також активно застосовуються алгоритми прогнозування на основі машинного навчання, які дозволяють передбачати зміну умов вітру і заздалегідь коригувати траєкторію літального апарата [5, 6]. Практична ефективність таких методів підтверджується численними експериментальними дослідженнями [4, 5, 11], де показано суттєве зниження відхилення БПЛА від траєкторії руху та енергоспоживання при використанні адаптивних алгоритмів.

Прогноз швидкості вітру розраховується через функцію прогнозу машинного навчання поточних та попередніх значень швидкості вітру $V_{\text{вітер}}(t)$ з урахуванням додаткових метеорологічних параметрів:

$$\vec{V}_{\text{вітер}}(t + \Delta t) = ML(\vec{V}_{\text{вітер}}(t), \text{метеодані}). \quad (11)$$

Для чисельних розрахунків руху БПЛА літакового типу у різних умовах впливу вітру на траєкторію руху було створене симуляційне середовище, яке дає змогу змінювати параметри вітру, початкові умови руху та власні характеристики БПЛА. Модель симуляції руху БПЛА складається з вхідних даних моделі – це початкове положення БПЛА та відповідний сценарій впливу вітру на траєкторію руху, розрахунків бокової складової вітру, алгоритму компенсації, який формує коригуючий сигнал, оновлення положення БПЛА на траєкторії руху та розрахунків енергоспоживання БПЛА під час руху. Після проходження БПЛА маршруту, фіксується відхилення БПЛА від оптимальної траєкторії руху та енергія, яка була витрачена БПЛА на проходження маршруту.

Для проведення порівняльного аналізу алгоритмів компенсації впливу вітру на рух БПЛА (PID-регулятор, фільтр Калмана, LSTM) у єдиній моделювальній системі було розраховано компоненти вітру $V_{wx} = V_w \cdot \cos(\alpha)$ – зустрічна складова та $V_{wy} = V_w \cdot \sin(\alpha)$ – бокова складова для різних сценаріїв вітру, наведених в табл. 1.

Для кожного сценарію симуляції руху БПЛА в умовах впливу вітру задається швидкість вітру, кут напрямку вітру до траєкторії руху БПЛА, розраховуються складові компоненти вітру.

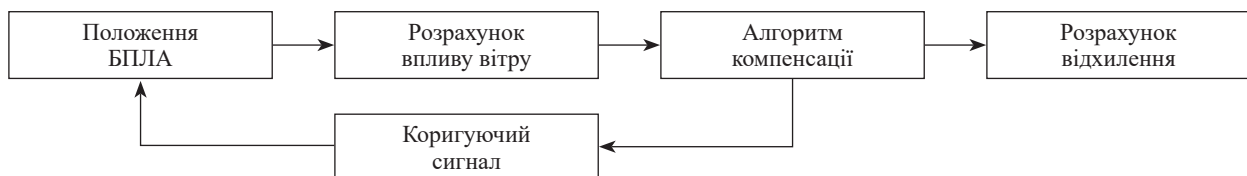
Т а б л и ц я 2. Складові компоненти вітру

V_w , м/с	α , °	V_{wx} , м/с	V_{wy} , м/с
5	0	5.00	0.00
5	45	3.54	3.54
5	90	0.00	5.00
10	0	10.00	0.00
10	45	7.07	7.07
10	90	0.00	10.00
15	0	15.00	0.00
15	45	10.61	10.61
15	90	0.00	15.00

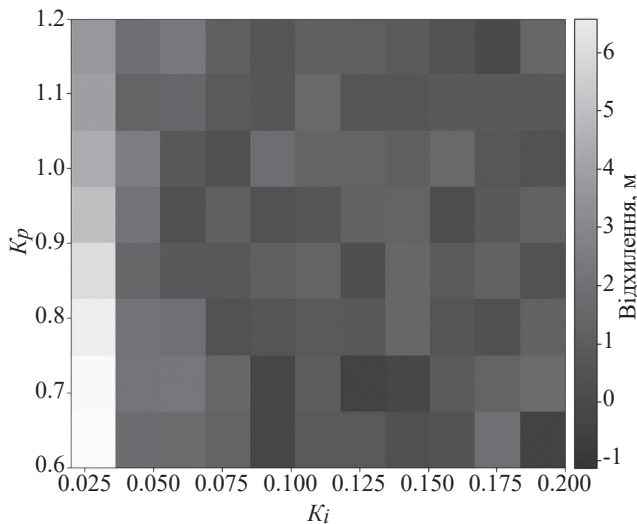
Побудована математична модель руху БПЛА включає в себе час польоту БПЛА, положення БПЛА на траєкторії у відповідний проміжок часу, відхилення БПЛА від початкової траєкторії руху, споживання БПЛА енергії, витраченої на компенсацію дії вітру на рух БПЛА. Алгоритми компенсації впливу вітру на рух БПЛА були побудовані наступним чином.

PID-регулятор – на кожному кроці симуляції руху БПЛА розраховується відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху. PID-регулятор формує коригуючий сигнал, з врахуванням фізичних та льотних характеристик БПЛА. Коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових – K_p , K_i , K_d , підібрані емпірично наступним чином: для кожної комбінації швидкості і кута вітру із табл. 2 беремо значення бокової складової вітру V_{wy} і встановлюємо такі діапазони значень коефіцієнтів – $K_p = [0,5-1,2]$ із кроком 0,1, $K_i = [0-0,2]$ із кроком 0,02, $K_d = [0-0,1]$ із кроком 0,01. Для кожної комбінації значень коефіцієнтів виконуємо 10 симуляцій польоту БПЛА тривалістю 55,56 с довжиною маршруту 1000 метрів. Фіксуємо значення середнього бокового відхилення і енергоспоживання для кожної симуляції.

Комбінація значень коефіцієнтів, яка дає мінімальне відхилення при допустимому енергоспоживанні обирається за дослідницьку. Отримані оптимальні значення: $K_p = 1,0$, $K_i = 0,10$, $K_d = 0,05$ забезпечують мінімальне відхилення БПЛА від траєкторії руху без осциляцій. Проведені симуляції для граничних значень $K_p = 1,2$, $K_i = 0,20$, $K_d = 0,10$ показали, що система стає схильною до осциляцій (перерегулювання), нестабільності або навіть розгойдування (відхилення починає зростати, а не зменшуватись), а значення керуючого сигналу перевищують фізичні показники досліджуваного БПЛА.



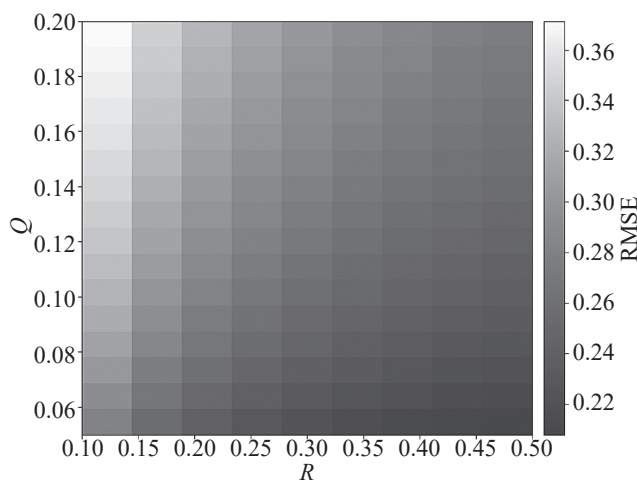
Р и с . 2. Схема симуляційного середовища



Р и с . 2. Теплова карта підбору коефіцієнтів K_p та K_i при $K_d = 0.05$, вітер 5 м/с, кут 45°

Наприклад, кут відхилення керма перевищує допустимі $20\text{--}30^\circ$. Система стає чутливою до шуму та збурень, що може призвести до аварійної ситуації.

Фільтр Калмана – на кожному кроці симуляції руху БПЛА вимірюється швидкість вітру. Фільтр Калмана розраховує справжню швидкість вітру, яка використовується для коригування траєкторії. Значення Q та R були визначені емпіричним шляхом на реальних метеоданих з Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA), які містять природний шум і варіації. Для кожної комбінації параметрів $Q = [0,05\text{--}0,2]$ з кроком 0,01 та $R = [0,1\text{--}0,5]$ з кроком 0,05 запускається симуляція вимірювання вітру з шумом (реальні метеодані + синтетичний шум), де на кожному кроці фільтр Калмана оцінює справжню швидкість вітру. Після завершення симуляції фіксується середня похибка оцінки (RMSE).

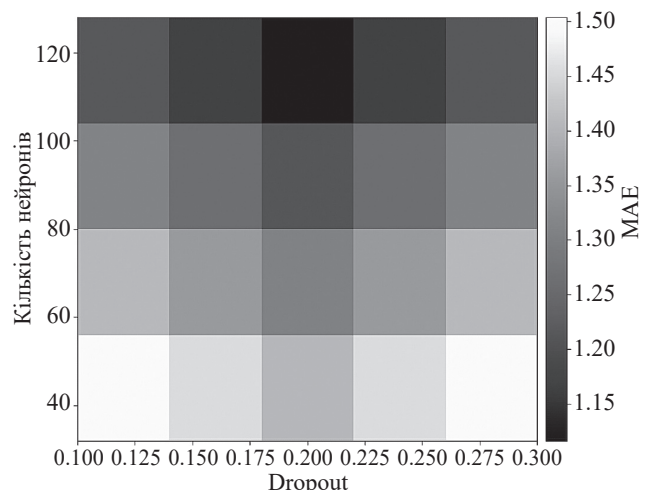


Р и с . 3. Теплова карта підбору значень Q та R

Комбінація значень $Q = 0.05$ та $R = 0.5$ дала найменшу помилку фільтрації (RMSE < 0.22).

3. LSTM-мережа – на кожному кроці симуляції руху БПЛА LSTM прогнозує швидкість вітру у проміжки часу з інтервалом 5 с. Поточна траєкторія руху

БПЛА коригується з урахуванням прогнозу положення БПЛА відносно впливу вітру. Застосована архітектура ML моделі – 2 шари (64 нейрони, активація tanh, return_sequences=True та 32 нейрони, активація tanh, return_sequences=False), Dropout 0.2, Adam, learning rate 0,001. Навчальна вибірка складала 50 000 значень, з яких 80 % становили реальні метеодані з NOAA (дані про швидкість вітру з метеостанції KSEA (Seattle-Tacoma International Airport) за 2023 рік з інтервалом 1 хвилина) та OpenWeatherMap (дані про швидкість і напрямок вітру для Києва, Україна, за 2023 рік з інтервалом 1 хвилина), та 20 % синтезовані пориви вітру. Навчання в 500 епох, batch 64 і середньоквадратична похибка MSE як функція втрат. На вхід ML моделі подається послідовність з 20 попередніх значень швидкості вітру, тобто 20 секунд історії. Реальні метеодані – [3.2, 3.5, 4.1, 5.0, 6.2, 7.1, 8.0, 7.5, 6.8, 5.9, 5.2, 4.8, 4.3, 3.9, 3.5, 3.2, 3.0, 2.8, 2.7, 2.5]. Синтезовані дані генеруються за наступних умов – базова швидкість вітру = 8 м/с, пориви = np.random.normal(0, 5), ймовірність появи пориву – 0.1 кожні 10 секунд, довжина серії: 10 000 значень – [8.0, 8.2, 7.9, 13.5, 8.1, 8.0, 8.3, 8.1, 2.5, 8.0, 8.2, 8.0, 8.1, 8.0, 8.0, 8.0, 8.0, 8.0, 8.0]. Дані для навчання нормалізуються (мін-макс нормалізація) та формуються вікна по 20 точок. На тестовій вибірці фіксуються значення MAE та MSE.



Р и с . 4. Теплова карта визначення кількості нейронів для ML моделі

Теплова карта ілюструє, що ML модель має найкращу точність при шарі у 128 нейронів, але для балансу швидкості та точності ML моделі вибір було встановлено на кількості шару в 64 нейрони.

Наведемо розрахунки відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху для сценарію слабого вітру 5 м/с під кутом 45° – $V_{wy} = 5 \cdot \sin(45^\circ) = 3.54$ м/с, аеродинамічний коефіцієнт $k = 0.1$. Початкове бокове відхилення за 1 с $e(1) = V_{wy} \cdot 1 = 3.54$ м. PID-сигнал $u(1) = 1.0 \cdot 3.54 + 0.1 \cdot 3.54 + 0.05 \cdot 3.54 = 1.15 \cdot 3.54 = 4.071$ м/с. Оновлення положення: $y_{t+1} = y_t + (3.54 - 4.071) \cdot dt$. Якщо PID-регулятор ідеально компенсує 95 % бокового вітру, то залишковий дрейф: $V_y, PID = 0.05 \cdot 3.54 = 0.177$ м/с, при цьому відхилення БПЛА від траєкторії руху складатиме $e_{PID} = 0.177 \cdot 55.56 \approx 9.83$ м. Але, враховуючи шум і неідеальність умов

Т а б л и ц я 3. Порівняльна таблиця для всіх сценаріїв постійного вітру

V_w , м/с	α°	Відхилення $e(t)$, м			Енергоспоживання $E(t)$, Дж		
		PID	Калман	LM	PID	Калман	LM
5	45	14.1	12.0	7.1	271	271	244
10	45	28.8	25.5	14.4	2158	2158	1942
15	45	43.3	39.0	21.7	7305	7305	6575
5	90	20.2	17.2	10.1	763	763	687
10	90	40.4	36.0	20.2	6112	6112	5501
15	90	60.5	53.7	30.3	20,625	20,625	18,563

впливу вітру на рух БПЛА, з симуляції отримуємо: $e_{PID} \approx 14.1$ м. Після фільтрації вимірювань Калманом, залишковий дрейф може бути меншим – $V_y, Kalman = 0.04 \cdot 3.54 = 0.142$ м/с, а з урахуванням реальних умов експлуатації БПЛА відхилення $e_{Kalman} \approx 12.0$ м. Помилка фільтрації RMSE із симуляції склала 1.31.

З табл. 3 чітко видно перевагу застосування LM моделі, яка забезпечує найменше відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху за, приблизно, однакового енергоспоживання у всіх сценаріях впливу постійного вітру під визначеним кутом до напрямку руху БПЛА. PID-регулятор є достатнім для слабкого вітру, а фільтр Калмана є ефективним лише при малому шумі вимірювань.

Для порівняння розрахунків за різними параметрами вітру, було проведено додаткові симуляції для поривів вітру та відсутності впливу вітру на траєкторію руху БПЛА. Вхідні дані для експериментального моделювання такі самі, як і в попередніх розрахунках і відповідають реальним параметрам сучасних БПЛА [1, 3]. Для кожного сценарію було розраховано час польоту, енергоспоживання та відхилення від оптимальної траєкторії.

Т а б л и ц я 4. Час польоту та енергоспоживання

Сценарій	Ефективна швидкість, V_{ef}	Час польоту, T	Енергоспоживання, E
Без вітру	18 м/с	55.6 с	1.85 Вт·год
Вітер 5 м/с під кутом 45°	21.54 м/с	46.4 с	1.70 Вт·год
Пориви вітру	18 м/с	61.42 с	2.1 Вт·год

У сценарії «Пориви вітру» ефективна швидкість БПЛА збігається із ефективною швидкістю сценарію «Без вітру» – 18 м/с тому, що середнє значення поривчастого вітру зазвичай коливається навколо нуля (тобто пориви вітру змінюють напрямок і силу, але в середньому не дають постійного зсуву швидкості у певному напрямку). Це типова спрощена модель для оцінки впливу турбулентності на напрямок руху літального апарата, коли немає сталого вітру, а є лише короточасні відхилення БПЛА від напрямку руху. Однак, у реальних умовах пориви вітру можуть як збільшувати, так і зменшувати ефективну швидкість БПЛА на окремих ділянках маршруту, а також викликати додаткові витрати енергоспоживання через постійні корекції траєкторії маршруту. Тому для більш точного моделювання

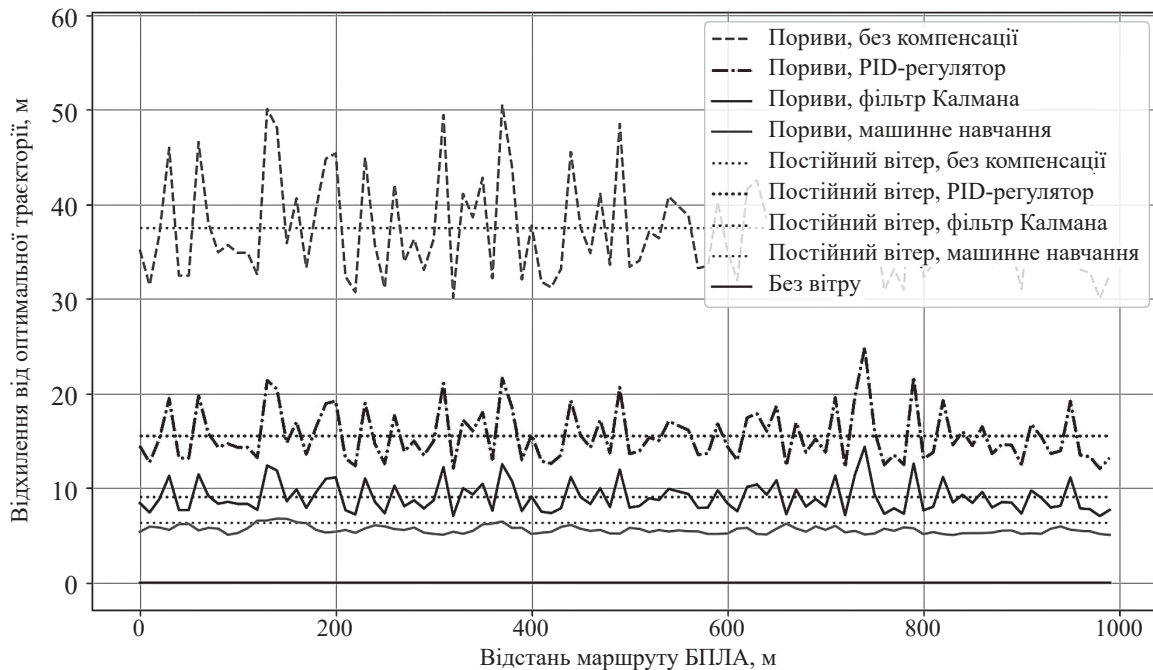
польоту БПЛА було враховано середньоквадратичне відхилення швидкості вітру та вплив кожного пориву окремо, а не лише його середнє значення. Як результат, це призвело до збільшення часу польоту та енергоспоживання БПЛА у порівнянні із сценарієм «Без вітру».

Особливу увагу приділено порівнянню ефективності різних методів компенсації впливу вітру на рух БПЛА: базового (без компенсації), з PID-регулятором, з фільтром Калмана та з використанням прогнозу на основі машинного навчання. Результати експериментів дають змогу стверджувати, що у порівнянні із звичайними алгоритмами, адаптивні методи компенсації впливу вітру дозволяють знизити відхилення від траєкторії руху БПЛА до 70 %. Зниження енергоспоживання при цьому можливо відповідно до 20 %. Схематичні та графічні ілюстрації результатів проведених експериментів підтверджують ефективність запропонованих підходів і можуть бути використані для подальшої оптимізації систем управління БПЛА. Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін параметрів вітру дозволяє БПЛА заздалегідь коригувати свою траєкторію, зменшуючи тим самим відхилення від заданої траєкторії руху навіть у складних умовах поривчастого вітру. У сучасних дослідженнях [5, 6, 11] показано, що застосування моделей LSTM або GRU для короткострокового прогнозу швидкості та напрямку вітру дозволяє знизити середнє відхилення від траєкторії руху БПЛА на 10–30 % у порівнянні із класичними адаптивними методами.

Т а б л и ц я 5. Результати моделювання для сценарію «Пориви вітру»

Метод компенсації	Середнє відхилення, м	Енергоспоживання, Вт·год.
Без компенсації	60	2.34
PID-регулятор	25	2.10
Фільтр Калмана	12	2.05
Машинне навчання (ML)	8	2.00

Модель машинного навчання, аналізуючи поточні та попередні значення швидкості вітру, прогнозує майбутні пориви вітру, що дозволяє БПЛА заздалегідь змінювати свої параметри курсу і швидкості. Це забезпечує найменше середнє відхилення від оптимальної траєкторії руху та найнижче енергоспоживання БПЛА серед усіх розглянутих методів.



Р и с . 5. Відхилення від оптимальної траєкторії для БПЛА літакового типу

ВИСНОВКИ

У статті проведено комплексний аналіз впливу вітру на ефективність алгоритмів побудови траєкторій руху безпілотних літальних апаратів літакового типу. На відміну від більшості попередніх робіт, де аналіз проводився або для одного алгоритму, або без порівняння на реальних параметрах БПЛА, проведено симуляцію трьох типів алгоритмів компенсації відхилення БПЛА від траєкторії руху для одного класу реальних БПЛА у трьох різних сценаріях вітру. Доведено, що при постійному або поривчастому вітрі відхилення БПЛА від оптимальної траєкторії руху має властивість накопичуватися вздовж маршруту, що може призводити до значних помилок позиціонування та підвищення енергоспоживання БПЛА, особливо за відсутності відповідної компенсації впливу вітру. Використання класичних методів компенсації впливу вітру на напрямок руху БПЛА, таких як PID-регулятор і фільтр Калмана, дозволяє суттєво зменшити темпи накопичення відхилення БПЛА від траєкторії руху, однак навіть ці підходи не завжди забезпечують достатню точність у складних умовах дії вітру або на довгих маршрутах руху БПЛА. Систематичний перебір параметрів PID-регулятора та фільтра Калмана для кожного сценарію дозволив отримати оптимальні налаштування для різних умов польоту та показати, як змінюється ефективність алгоритмів залежно від сили та напрямку вітру. Найкращі результати продемонстрували алгоритми на основі машинного навчання, які здатні прогнозувати зміни параметрів вітру на кілька секунд наперед і проактивно коригувати траєкторію польоту БПЛА. Для навчання LM-мережі застосовано реальні метеодані NOAA та OpenWeatherMap із поєднанням синтезованих даних з генератора поривів вітру, що збільшило точність прогнозу та адаптивність алгоритму до реальних погодних умов. Це дозволяє не лише зменшити середнє та максимальне відхилення БПЛА від оптималь-

ної траєкторії, а й знизити енергоспоживання БПЛА за рахунок більш плавних і ефективних маневрів. Графік із симуляції є результатом чисельного інтегрування динаміки системи з урахуванням усіх ефектів – накопичення інтегральної складової, обмеження сигналу, реальної поведінки корекцій напрямку руху БПЛА у часі.

Чисельні експерименти показали, що адаптивна компенсація впливу вітру дозволяє знизити відхилення БПЛА від траєкторії руху до 70 % і енергоспоживання до 20 % у порівнянні із звичайними алгоритмами. Відповідно, застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє зменшити накопичене відхилення від траєкторії руху у 2–3 рази порівняно з класичними підходами, а середнє відхилення БПЛА від траєкторії руху за маршрутом може бути знижене до 8–10 м навіть у складних умовах поривчастого вітру. Це підтверджує доцільність впровадження інтелектуальних систем прогнозування параметрів вітру у сучасні бортові контролери БПЛА літакового типу для підвищення точності, безпеки та енергоефективності автономних польотів на великі відстані. Практичні рекомендації стосуються впровадження компенсації впливу вітру у реальні системи управління БПЛА літакового типу. Перспективи подальших досліджень – розробка гібридних методів компенсації впливу вітру на рух БПЛА та їх інтеграція у бортові контролери безпілотних літальних апаратів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Haghghi, H., Delahaye, D., Moschetta, J.-M. & Asadi, D. (2025). UAV Trajectory Optimization for Maximum Soaring in Windy Environment. *Unmanned Systems*. № 13(2). Pp. 399—412. <https://doi.org/10.1142/S2301385025500232>
2. Dai, X., Duo, B., Yuan, X. & Di Renzo, M. (2023). Energy-Efficient UAV Communications in the Presence of Wind: 3D Modeling and Trajectory Design. *arXiv*

- preprint arXiv:2304.06909. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06909>
3. Jayaweera, H. M. P. C. & Hanoun, S. (2022). Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Windy Environments. *Drones*. № 6(5). P. 101. <https://doi.org/10.3390/drones6050101>
 4. Lian, F., Li, B., Yang, Q., Zhu, H. & Du, D. (2024). WALPA*: An Energy-Aware Path-Planning Algorithm for UAVs in Dynamic Wind Environments. *Drones*. № 8(3). P. 92. <https://doi.org/10.3390/drones8030092>
 5. Pu, H., Liu, X., Yang, S., Luo, C., He, Y., Chen, M. & Zheng, X. (2026). A Wind Field–Perception Hybrid Algorithm for UAV Path Planning in Strong Wind Conditions. *Algorithms*. № 19(2). P. 97. <https://doi.org/10.3390/a19020097>
 6. Zhang, Y., Lyu, J. & Fu, L. (2021). Energy-Efficient Trajectory Design for UAV-Aided Maritime Data Collection in Wind. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. № 20(10). Pp. 6402—6416. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3187954>
 7. Рижков Л. М., Пономаренко К. В. Аналіз основних властивостей траєкторій і впливу вітру на точність наведення БПЛА при застосуванні різних методів самонаведення. *Механіка гіроскопічних систем*. 2012. № 25. С. 39—49. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7160>
 8. Серєда А. В., Даценко І. П. Дослідження впливу вітру на управління безпілотним літальним апаратом у віртуальному середовищі Unity3D. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2024. № 1(07). С. 99—102. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-14>
 9. Chakrabarty, A. & Langelaan, J. UAV flight path planning in time varying complex wind-fields. 2013 American Control Conf. (ACC). Washington. DC. USA. June 17-19. 2013. Pp. 2574—2580. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580221>
 10. Siqueira, J. C. D. C. (2017). Modeling of Wind Phenomena and Analysis of Their Effects on UAV Trajectory Tracking Performance. MS Thesis, Statler College of Engineering and Mineral Resources, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia Univ. <https://doi.org/10.33915/etd.7347>
 11. Liu, J., Li, Y., Yang, H., Wu, J. & Qu, Q. (2026). Research on the Impact of Urban Extreme Wind Fields on UAVs' Flight Stability in Typical Scenarios. *Applied Sciences*. № 16(1). P. 145. <https://doi.org/10.3390/app16010145>
 12. Куліш Р. В. Модель урахування бічного вітру при плануванні маршрутів польоту безпілотного літального апарата. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2024. № 1. С. 16. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.016>
 13. Yu Jian, Сітнікова О. Метод прогнозування траєкторій та ухилення БПЛА для промислових автономних місій у динамічному середовищі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2026. № 1(35). С. 100. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2026.1.100>
 14. Ролік О., Смолій В., Смолій Н. Метод короткострокового планування траєкторії БПЛА. Адаптивні системи автоматичного управління. 2025. № 2(47). С. 185—203. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.47.2025.340207>
 15. Gao, J., Liu, X., Xia, Y., Shang, S., Pang, T. & Yang, B. (2026). A Wind-Aware Path Planning Method for UAVs in Urban Environments. 2nd Intern. Conf. on Electrical Automation and Artificial Intelligence (ICEAAI). 16–18 January 2026. Pp. 1—6. <https://doi.org/10.1109/ICEAAI68945.2026.11442519>

REFERENCES

1. Haghghi, H., Delahaye, D., Moschetta, J.-M. & Asadi, D. (2025). UAV Trajectory Optimization for Maximum Soaring in Windy Environment. *Unmanned Systems*. № 13(2). Pp. 399—412. <https://doi.org/10.1142/S2301385025500232>
2. Dai, X., Duo, B., Yuan, X. & Di Renzo, M. (2023). Energy-Efficient UAV Communications in the Presence of Wind: 3D Modeling and Trajectory Design. *arXiv preprint arXiv:2304.06909*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06909>
3. Jayaweera, H. M. P. C. & Hanoun, S. (2022). Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Windy Environments. *Drones*. № 6(5). P. 101. <https://doi.org/10.3390/drones6050101>
4. Lian, F., Li, B., Yang, Q., Zhu, H. & Du, D. (2024). WALPA*: An Energy-Aware Path-Planning Algorithm for UAVs in Dynamic Wind Environments. *Drones*. № 8(3). P. 92. <https://doi.org/10.3390/drones8030092>
5. Pu, H., Liu, X., Yang, S., Luo, C., He, Y., Chen, M. & Zheng, X. (2026). A Wind Field–Perception Hybrid Algorithm for UAV Path Planning in Strong Wind Conditions. *Algorithms*. № 19(2). P. 97. <https://doi.org/10.3390/a19020097>
6. Zhang, Y., Lyu, J. & Fu, L. (2021). Energy-Efficient Trajectory Design for UAV-Aided Maritime Data Collection in Wind. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. № 20(10). Pp. 6402—6416. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3187954>
7. Ryzhkov, L. M., & Ponomarenko, K. V. (2012). “Analiz osnovnykh vlastyivostei traiektorii i vplyvu vitru na tochnist navedennia BPLA pry zastosuvanni riznykh metodiv samonavedennia” [Analysis of the main properties of trajectories and the influence of wind on the accuracy of UAV guidance using various homing methods]. *Mekhanika gyroskopichnykh system*. № 25. Pp. 39—49. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7160>
8. Sereda, A. V., & Datsenko, I. P. (2024). “Doslidzhennia vplyvu vitru na upravlinnia bezpilotnym litalnym aparatom u virtualnomu seredovyshchi Unity3D” [Effect of wind on UAV control in Unity3D environment]. *Infocommunication and Computer Technologies*. № 1(07). Pp. 99—102. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-14>
9. Chakrabarty, A. & Langelaan, J. UAV flight path planning in time varying complex wind-fields. 2013 American Control Conf. (ACC). Washington. DC. USA. June 17-19. 2013. Pp. 2574—2580. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580221>
10. Siqueira, J. C. D. C. (2017). Modeling of Wind Phenomena and Analysis of Their Effects on UAV Trajectory Tracking Performance. MS Thesis, Statler College of Engineering and Mineral Resources, Department of Mechanical and

- Aerospace Engineering. West Virginia Univ. <https://doi.org/10.33915/etd.7347>
11. Liu, J., Li, Y., Yang, H., Wu, J. & Qu, Q. (2026). Research on the Impact of Urban Extreme Wind Fields on UAVs' Flight Stability in Typical Scenarios. *Applied Sciences*. № 16(1). P. 145. <https://doi.org/10.3390/app16010145>
 12. Kulish, R. V. (2024). "Model urakhuvannia bichnoho vitru pry planuvanni marshrutiv polotu bezpilotnoho litalnoho aparatu" [The model of crosswind accounting for flight route planning of unmanned aerial vehicle]. *Control, Navigation and Communication Systems*. № 1. P. 16. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.016>
 13. Yu Jian, Сітнікова О. Метод прогнозування траєкторій та ухилення БПЛА для промислових автономних місій у динамічному середовищі. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2026. № 1(35). С. 100. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2026.1.100>
 14. Rolik, O., Smolii, V., & Smolii, N. (2025). Short-term UAV trajectory planning method. *Adaptive Systems of Automatic Control*. № 2(47). Pp. 185—203. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.47.2025.340207>
 15. Gao, J., Liu, X., Xia, Y., Shang, S., Pang, T. & Yang, B. (2026). A Wind-Aware Path Planning Method for UAVs in Urban Environments. 2nd Intern. Conf. on Electrical Automation and Artificial Intelligence (ICEAAI). 16–18 January 2026. Pp. 1—6. <https://doi.org/10.1109/ICEAAI68945.2026.11442519>

Liutfaliiev E. G.

ANALYSIS OF WIND INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF TRAJECTORY PLANNING ALGORITHMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES AND DEVELOPMENT OF EXTERNAL FACTOR COMPENSATION METHODS

This paper studies the effect of wind on the success rate of path planning algorithms for a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV). We thoroughly review the literature on state-of-the-art wind compensation approaches, including adaptive schemes as well as optimization techniques, with a particular emphasis on fixed-wing UAVs. Wind effects on the flight dynamics and power consumption are modeled. Here we show how to compensate for such external perturbations as wind via PID controllers, Kalman filters

and machine learning prediction models in details. The simulation setup, the input parameters (mass, wing span, cruise speed, wind parameters), and the scenarios (steady wind, wind gusts, no wind) are introduced in the experimental section. In the calculations are provided the trajectory distortion, both energy consumption and flying time. Schematic illustrations of the UAV trajectory in wind fields as well as the efficiency of compensation methods.

The results illustrate that adaptive compensation can reduce the trajectory errors and the energy consumption of up to 70 % and 20 %, respectively, when compared to the baseline algorithms. The paper ends with practical guidelines for the implementation of wind compensation in actual UAV control systems and by listing opportunities for future research, including extensions of hybrid compensation methods and their incorporation into onboard flight controllers.

Keywords: *fixed-wing UAV, wind compensation, trajectory planning, PID controller, Kalman filter, machine learning, energy consumption, simulation.*

Відомості про авторів:

Лютфалієв Еміль Георгійович

аспірант інституту прикладного системного аналізу Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-9070-6632>
email: emile@ukr.net

Information about the authors:

Liutfaliiev Emil

PhD Student
Institute for Applied System Analysis
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-9070-6632>
email: emile@ukr.net

Стаття прийнята до редколегії 11.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 629.052

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).75-86](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).75-86)

А. С. ДОВГОПОЛИЙ, доктор технічних наук
професор
<https://orcid.org/0000-0001-9227-9771>

О. О. БІЛОБОРОДОВ, доктор технічних наук
старший дослідник
<https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>

С. М. ПЕТРУК, кандидат технічних наук
старший дослідник
<https://orcid.org/0000-0002-9644-1550>

С. Б. ПАНТЕЛЕЄВ
<https://orcid.org/0009-0004-2895-388X>
(Центральный науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ У ВІЙСЬКОВІЙ СФЕРІ

Авторами пропонується цикл статей, присвячених аналізу супутникових навігаційних систем та перспективам їх використання в системі озброєння Збройних Сил України. У першій з них проведено аналіз застосування технологій супутникової навігації у військовій сфері. Друга стаття буде присвячена аналізу основних супутникових приймачів і антен та виробленню рекомендацій щодо застосування їх у вітчизняних супутникових навігаційних системах. У третій статті буде проведено аналіз структури похибок супутникових навігаційних систем та дослідження основних факторів, які визначають точність параметрів цих систем та умов втрати навігаційного рішення приймачами.

У цій статті проведено аналіз тенденцій розвитку навігаційних приймачів: від перших GPS до багатосистемних структур. Показано, що досягнення навігаційної переваги стає критичним чинником військового успіху.

Проведено огляд світових глобальних систем супутникової навігації, проаналізовані їх переваги та недоліки. Визначено основні вимоги до супутникових навігаційних систем військового призначення. Проведено аналіз методів боротьби з втручанням у роботу супутникової навігації, зокрема з використанням технологій *anti-jamming* та *anti-spoofing*. Зроблено висновок про критичну важливість для України створити власну систему навігаційної стійкості на базі принципів GNSS+INS+AI (системи супутникової навігації + інерціальні системи + штучний інтелект), розвивати антени з просторовим захистом та інтегруватися у мережеві стандарти НАТО.

Ключові слова: супутникові навігаційні системи, глобальні супутникові системи, GPS, ГЛОНАСС, Galileo, забезпечення військ навігаційною інформацією, за-

вадостійкість супутникових навігаційних систем (*anti-jam/anti-interference*), стійкість до підміни (*anti-spoofing*).

ВСТУП

Супутникові навігаційні системи (СНС, англ. GNSS – Global Navigation Satellite System) стали одним із найважливіших елементів сучасних військових технологій. У XXI столітті роль GNSS перевершує класичні методи позиціонування за масштабом покриття, швидкістю роботи та рівнем автоматизації: вони забезпечують наведення високоточної зброї, синхронізацію систем зв'язку, управління військами, логістичні операції, а також координацію дій на суші, морі та у повітрі.

Військові дії останніх років, включаючи бойові дії в Україні та операції США у Венесуелі та Ірані, довели, що навігаційна перевага стає критичним чинником у досягненні успіху. Доступ до точного, захищеного та стійкого GNSS-сигналу забезпечує перевагу у часі реагування, точності ударів і координації бойових дій.

Сьогодні у світі функціонують чотири повноцінні глобальні супутникові навігаційні системи: GPS (США), Galileo (ЄС), BeiDou (КНР) та ГЛОНАСС (рф). Також існують регіональні системи QZSS (Японія) та NavIC/IRNSS (Індія). Усі вони виконують як цивільні, так і військові функції, однак відрізняються рівнем технологічного розвитку, точністю, криптографічним захистом і методами протидії завадам [1–9].

Для України питання ефективного використання GNSS має стратегічне значення. З огляду на триваючу війну та активне використання противником засобів радіоелектронної боротьби, надійність і стійкість навігаційних систем стають запорукою боєздатності військових підрозділів, артилерійських розрахунків, БпЛА і систем управління озброєнням.

Мета роботи: проведення аналізу застосування сучасних GNSS та їх характеристик у військовій сфері, оцінка методів захисту сигналів GNSS від зовнішніх джерел та напрямків розвитку технологій супутникової навігації для застосування у Збройних Силах України.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розвиток навігаційних приймачів: від перших GPS до багатосистемних комплексів

Перші військові GPS-приймачі з'явилися в 1980-х роках – на той час громіздкі, з обмеженими каналами та одночастотні. Прикладом є американський AN/PSN-11 PLGR (Precision Lightweight GPS Receiver), прийнятий на озброєння у 1990 році. PLGR був 5-канальним одночастотним (L1) приймачем з можливістю доступу до прецизійного P(Y)-коду та мав вагу близько 1,25 кг з батареями [7, 8]. Цей прилад забезпечував точність в межах 10–20 м і використовувався у війні в Перській затоці 1991 року, надавши військам базову навігацію в пустелі. Його замінив AN/PSN-13 DAGR (Defense Advanced GPS Receiver) у 2004 році – двочастотний (L1/L2) 12-канальний приймач із шифрованим доступом (SAASM) та графічним дисплеєм [8]. DAGR був суттєво легшим (~0,43 кг) і швидшим, а головне – більш стійким до завад: забезпечував ~41 дБ захисту від радіоелектронного подавлення (відношення потужності завади до

потужності корисного сигналу на вході, англ. J/S) при відстеженні сигналів проти ~ 24 дБ у PLGR. Це означає збереження роботи навіть за наявності потужних перешкод. DAGR став масово використовуватися США та її союзниками (понад 125 тисяч одиниць на кінець 2006 року) [8, 9].

Згодом, із розгортанням нових GNSS, виникла потреба у приймачах, що підтримують не лише GPS. Український виробник «Оризон-Навігація» з 1990-х років розробляв двосистемні GPS/ГЛОНАСС-приймачі для авіації, флоту, бронетехніки тощо [10]. Наприклад, портативний приймач СН-3003М цієї компанії має 24 канали для GPS/ГЛОНАСС L1, із заявленою точністю ~ 10 м (СКВ) і важить $\sim 0,8$ кг [11], зокрема, повідомлялося про оснащення модернізованих РСЗВ «Верба» українським навігаційним комплексом від «Оризон-Навігації», що працює з GPS, ГЛОНАСС для точного прив'язування координат [11].

У рф власні ГЛОНАСС-приймачі масово стали впроваджуватися у 2000-х роках, коли угруповання ГЛОНАСС відновило працездатність після деградації у період 1996 – 2001 роки. Для підвищення точності позиціонування багато російських систем використовують GNSS-приймачі, що одночасно обробляють сигнали систем GPS і ГЛОНАСС.

Огляд глобальних систем супутникової навігації

Загальна характеристика

Супутникові системи навігації забезпечують безперервне визначення координат, швидкості й часу для користувачів на поверхні Землі, у повітрі чи на морі. Кожна з систем має власну орбітальну групу супутників, контрольні центри та формати навігаційних сигналів.

Основні системи GNSS перелічені в роботах [1–11] та наведені нижче.

GPS (Global Positioning System, США) – працює з 1995 року, налічує 31 активний супутник. Система має сигнал відкритого доступу L1 C/A та військовий M-code із криптографічним захистом і підвищеною стійкістю до завад.

Galileo (Європейський Союз) – розроблена ESA (Європейське космічне агентство) і EUSPA (Агентство Європейського Союзу з питань космічної програми). Забезпечує глобальне покриття та має зашифрований канал PRS (Public Regulated Service), який призначений для військових і урядових структур ЄС.

BeiDou (КНР) – третє покоління системи, повністю глобальне з 2020 року. Підтримує відкриті сигнали B1I, B1C і B2a, комерційні високоточні сервіси (B2b) та сигнали обмеженого доступу (B3), а також сервіс коротких повідомлень (RDSS), що дозволяє передавати текстову інформацію та координати через супутникову інфраструктуру, що важливо для бойових умов.

ГЛОНАСС (російська федерація) забезпечує глобальне покриття. Точність визначення координат у відкритому сервісі зазвичай становить кілька метрів і є порівнянною з іншими GNSS. У межах модернізації системи (супутники серії GLONASS-K/K2) впроваджуються нові сигнали та покращені характеристики стабільності, однак їхній вплив залежить від ступеня розгортання орбітального угруповання.

QZSS (Японія) — регіональна система, що доповнює GPS у Азійсько-тихоокеанському регіоні, має режим військової синхронізації «Military-SOS».

IRNSS/NavIC (Індія) — регіональна система для Індії та сусідніх країн, використовує зашифрований військовий канал IRNSS-S.

Військові сигнали GNSS відрізняються від сигналів відкритого доступу застосуванням криптографічного захисту, механізмів автентифікації та перевірки цілісності навігаційних повідомлень, а також підвищеною завадостійкістю, що забезпечує їхню працездатність в умовах активних радіоперешкод і навмисних впливів, зокрема спуфінгу. Сигнал M-code системи GPS є окремим військовим сигналом, що передається на частотах L1 та L2 із використанням широкосмугових спектральних методів, забезпечуючи підвищену точність позиціонування та завадостійкість. Сигнал PRS системи Galileo має подібні функціональні характеристики, однак реалізований із застосуванням європейських криптографічних механізмів. У системі BeiDou використовуються власні методи автентифікації та псевдовипадкові кодові послідовності для забезпечення захисту та цілісності сигналів. Точність позиціонування GNSS для користувачів відкритого сервісу зазвичай становить 1–5 метрів. Для військових систем (систем обмеженого доступу), завдяки застосуванню криптографічного захисту, автентифікації сигналів і багаточастотним каналам, досягається точність до 0,3–0,5 метра. При інтеграції GNSS з інерціальними системами (INS) у короткочасному інтервалі можливо досягти точності близько 0,1 м [1–11].

Системи нового покоління, зокрема GPS III та Galileo PRS характеризуються високими показниками надійності та завадостійкості. Система BeiDou демонструє підвищену ефективність у складних умовах прийому, зокрема в міській забудові та гірській місцевості, а ГЛОНАСС має обмеження, пов'язані із стабільністю характеристик [1, 3, 4].

GNSS забезпечують функціонування широкого спектра військових застосувань, охоплюють практично всі рівні – від стратегічного командування до тактичної навігації.

Застосування GNSS у військовій сфері тісно пов'язане із концепцією мережецентричної війни, де позиціонування, навігація та час забезпечують координацію, синхронізацію та ефективність бойових дій [1].

Основні вимоги до супутникових навігаційних систем військового призначення

GNSS у військовому застосуванні мають забезпечувати війська навігаційною інформацією (координати, швидкість, курс та єдиний час) для безпечного переміщення та ефективного застосування ОБТ, у т. ч. в умовах протидії противника [12]. На практиці це означає, що вимоги до військових навігаційних рішень жорсткіші за цивільні через загрози РЕБ, кібервпливу та потребу безперервної роботи [13].

Основні вимоги до GNSS військового призначення забезпечуються шляхом комплексного поєднання технічних і організаційних заходів. Ключовим є застосування захищених сигналів і контролю доступу, а також використання anti-jamming та anti-spoofing методів для

протидії радіоелектронному подавленню та хибному навігаційному рішенню. Використання багаточастотних та багатосистемних приймачів GNSS забезпечує підвищення доступності і безперервності навігаційного рішення у складних умовах прийому сигналів. Обов'язковим є резервування навігації за рахунок інерціальних систем, одометрії та режимів утримання часу при втраті супутникового сигналу. Додатково вимоги підтримуються стандартизацією, підготовкою персоналу та регулярними випробуваннями в умовах, наближених до бойових.

Ключові вимоги (показники якості позиціонування, навігації та часу (PNT)):

- точність – відповідність визначених координат/швидкості/часу реальним значенням у заданій системі координат; для різних задач (артилерія, БпЛА, логістика, синхронізація мереж) потрібні різні рівні точності [13];
- цілісність – здатність своєчасно виявляти втрату достовірності навігаційних даних (внаслідок помилок, збоїв або навмисних впливів) та забезпечувати інформування про це користувача або суміжних систем [12, 13];
- безперервність і доступність – робота в різних режимах (норма, під атакою (завадою), під час відновлення) з мінімальними перервами; визначаються допустимі «вікна» втрати сигналу/часу [13];
- покриття – це здатність навігаційної системи забезпечувати виконання навігаційних задач у заданих географічних районах і для різних профілів руху (земля, повітря, море), включно зі складним рельєфом та міською забудовою [13].

Вимоги стійкості до РЕБ і підміни сигналів NAVWAR (Navigation Warfare, навігаційна війна):

- завадостійкість (anti-jam, anti-interference) – працездатність при активних, пасивних завадах (пригнічення сигналу), зокрема через технічні засоби подавлення та алгоритми виявлення аномалій [14];
- стійкість до підміни (anti-spoofing) – здатність виявляти та відхиляти «фальшиві» навігаційні сигнали/дані; важливі механізми перевірки достовірності та узгодженості рішень [13, 14];
- багатоканальність і перехресна перевірка – використання кількох діапазонів частот, систем, а також перевірки узгодженості PNT-даних, щоб швидше виявляти їх відхилення або підміну [13].

Кібер- та інформаційна безпека навігаційних даних:

- автентичність і керування доступом – підтвердження «хто/що» є джерелом PNT-даних та хто має правом користуватися (на рівні обладнання, програмного забезпечення, мережних компонентів) [13];
- захист даних у системі (у т. ч. журналів/міток часу) – недопущення підробки, зміни або заперечення даних; за потреби – шифрування та контроль їх цілісності [13];
- безпечна експлуатація – підготовка персоналу до виявлення та реагування на «скомпрометовані» навігаційні дані та інциденти [13].

Вимоги живучості та резервування:

- робота при втраті GNSS сигналів на приймачі (GNSS-denied) – наявність «шарів» резервуван-

ня: інерціальні системи (INS), одометрія, курсові датчики, локальні маяки, опорні джерела часу, режим утримання для часу [12, 13];

- висока швидкість відновлення – визначені процедури і параметри відновлення точності/цілісності після впливу перешкод або збоїв [13].

Сумісність, стандартизація та експлуатаційні вимоги:

- сумісність у міжвидових та коаліційних діях з військовими підрозділами країн-партнерів – підтримка стандартизованих систем координат і форматів даних, узгоджені процеси доведення навігаційної інформації, можливість інтеграції з автоматизованими системами управління [12];
- надійність і ремонтпридатність СНС – прогнозована відмова, ресурс, зручність техобслуговування, діагностика [12];
- врахування обмежень носія складової СНС (боєприпаси, БпЛА, бронетехніка, переносні комплекти) – маса, габарити, енергоспоживання [12].

Методи anti-jamming у GNSS військового (спеціального) призначення

Jamming (подавлення) – це навмисне створення радіоелектронних перешкод з метою пригнічення або повного зриву прийому супутникових навігаційних сигналів приймачем GNSS. Такі перешкоди зазвичай мають більшу потужність, ніж корисний сигнал GNSS, що призводить до втрати кореляції та навігаційного рішення. Jamming є типовим засобом радіоелектронної боротьби проти навігаційних систем і систем управління.

До основних методів anti-jamming у GNSS військового призначення відноситься просторова селекція сигналів шляхом використання антенних решіток, частотно-часові методи обробки інформації в приймачах, використання багаточастотних приймачів або декількох різних систем супутників.

Антенні методи (просторова селекція)

Використання антенних решіток з цифровим формуванням діаграми спрямованості (CRPA). Антенна решітка оцінює напрямок надходження радіоелектронних перешкод та створює «провали» діаграми спрямованості у напрямку джерела, забезпечуючи їх пригнічення, одночасно зберігаючи прийом корисних сигналів супутників. Це один із найефективніших підходів протидії потужним джерелам радіоелектронних перешкод, особливо тим, які мають виражений напрям приходу сигналу [16].

Частотно-часові методи на рівні приймача (приймання сигналу та цифрова обробка)

Вирізання, пригнічення вузькосмугових радіоелектронних перешкод та адаптивні смугово-загороджувальні фільтри: якщо перешкода займає вузьку смугу частот, приймач може автоматично «вирізати» її в цій частотній області (або застосувати адаптивний режекторний фільтр, який відстежує частоту перешкоди) і тим самим зберегти працездатність корелятора GNSS. Такі методи найкраще працюють проти вузькосмугових радіоелектронних перешкод; їх ефективність знижується проти широкосмугових перешкод [15, 17].

Архітектурні методи підвищення стійкості (багаточастотність та контроль)

Багаточастотність та багатосистемний прийом, а також керування режимами: використання кількох частот і (за можливості) кількох GNSS зменшує ризик повної втрати навігаційного рішення, оскільки радіоелектронна перешкода, як правило, має неоднорідний спектральний характер. Додатково застосовують моніторинг радіоелектронної обстановки і перемикання режимів роботи приймача при погіршенні умов. Це зазвичай поєднують із виявленням фактів радіоелектронних перешкод (індикатори присутності перешкод, аномалії в кореляції, AGC тощо) та політиками деградації сервісу (наприклад, пріоритет часу або грубої навігації) [15].

Методи anti-spoofing у GNSS

Spoofing – це навмисна підміна навігаційних сигналів та даних так, щоб приймач «повірів» у хибні координати або час. Тому anti-spoofing зазвичай будують як поєднання криптографічної автентифікації та виявлення аномалій, невідповідностей у вимірах і поведінці сигналу [13, 17].

Автентифікація навігаційних даних (cryptographic authentication)

Найнадійніший принцип – перевіряти «походження» навігаційного повідомлення (чи справді дані надійшли від супутникової системи і не були змінені). Приклад – Galileo OSNMA (Open Service Navigation Message Authentication): супутники передають додаткові автентифікаційні дані, а приймач перевіряє криптографічні ознаки справжності навігаційного повідомлення [18]. Це суттєво ускладнює підміну саме навігаційних даних (ефемериди, час, повідомлення).

Перевірки узгодженості та цілісності приймання навігаційних сигналів

Поширений клас методів anti-spoofing – автономні перевірки достовірності. Приймач порівнює, чи узгоджуються псевдовідстані, доплерівські зсуви між собою та з моделлю руху, а також контролює різкі «стрибки» координат, швидкості, часу. У профілях керування ризиками PNT це розглядають як практики виявлення маніпуляцій PNT-даними та реагування на підозрілі відхилення [13]. Якщо спуфер змушує рішення стрибати, внутрішні тести узгодженості можуть зафіксувати аномалію та перевести систему в безпечний режим.

Просторові методи (антенна решітка, напрямок приходу сигналу)

За умови наявності у приймача двох або більше антен, можна оцінювати напрямок надходження сигналів. Для сигналів реальних супутників характерна різноманітність напрямків надходження, зумовлена їхнім

просторовим розташуванням, а для локального джерела підмінених сигналів часто виникає аномальна просторова структура (сигнали приходять з одного напрямку та мають узгоджені фазові співвідношення). Експериментальні роботи показують, що мультиантенні підходи можуть забезпечувати виявлення підміни сигналів силами самого приймача (receiver-autonomous spoofing detection) [19].

Крім того, методи формування провалів діаграми спрямованості багатоеlementної антени зазвичай базуються на режекції найбільш потужних сигналів (у якості яких виступають перешкоди), що забезпечує й пригнічення дезінформаційної навігаційної перешкоди, яка має високий рівень потужності порівняно із справжніми навігаційними сигналами.

Порівняння GNSS цивільного та військового призначення

GNSS сервіси з відкритим доступом (цивільного призначення, наприклад, GPS SPS) надаються широкому колу користувачів, визначаються відкритими характеристиками сигналу та заявленими показниками точності і доступності [20].

Сервіси обмеженого доступу – військового призначення, або урядово-обмежені сервіси (наприклад, GPS PPS або Galileo PRS) призначені для авторизованих користувачів і мають підвищені вимоги до безперервності функціонування, керуваності доступу та стійкості до навмисних впливів (завади, підміна). Це забезпечується застосуванням криптографічного захисту, механізмів автентифікації та спеціалізованих режимів роботи приймачів [21].

Ключова відмінність полягає в моделі доступу та рівні захисту: сигнали та повідомлення цивільного застосування зазвичай відкриті (простіше сумісність і масове застосування), але вразливіші до РЕБ та підміни навігаційних даних; військового застосування (обмежені) – використовують механізми контролю доступу та проєктуються для роботи в умовах протидії, включно зі сценаріями «GNSS-denied» [22].

Також відрізняються пріоритети експлуатації: для цивільного сегмента критичні стандартизованість і передбачувана якість сервісу для широкого ринку, тоді як для військового – живучість, інформаційна безпека та відповідність тактичним вимогам (ризик підміни та подавлення розглядаються як базові загрози) [23].

Відповідно до публікацій [20–24] складена порівняльна таблиця можливостей GNSS військового і цивільного застосування (табл. 1).

Т а б л и ц я 1

Система	Військовий канал	Точність, м (військова/ цивільна)	Стійкість до завад	Рік модернізації
GPS (США)	M-code (шифрований)	0,3 / 1,5	висока	2024
Galileo (ЄС)	PRS (шифрований)	0,5 / 1,0	висока	2024
BeiDOU (КНР)	B2b (шифрований)	0,5 / 1,0	середня-висока	2023
ГЛОНАСС	CDMA військовий	1,0 / 3,5	середня	2024
IRNSS/ Navic (Індія)	IRNSS-S	10 / 20	середня	2023
QZSS (Японія)	Military-SOS	1 / 1,2	висока (регіональний сигнал)	2025

З табл. 1 слідує, що:

- всі згадані типи СНС мають захищений військовий канал передачі сигналу від супутників до приймачів споживача;
- похибка визначення координат кращих систем GPS, Galileo та BeiDOU досягає 0,5 м для військового та 1,5 м для цивільного застосування;
- найбільш високу захищеність від завад мають системи GPS, Galileo та QZSS.

Адаптація GNSS до різних платформ

При інтеграції GNSS у військові системи виникають наступні ключові проблеми [25–36]:

- антена має приймати сигнал від якомога більшої кількості супутників та не мати фізичних перепон у оточуючому середовищі;
- необхідно враховувати фізичні навантаження і вібрації від об'єкта, на якому встановлюється антена;
- необхідно враховувати проблему електромагнітної сумісності з РЛС, радіостанціями, РЕБ, іншими бортовими джерелами радіоелектронних перешкод, які можуть забивати слабкі сигнали GNSS та визначати шляхи боротьби з ними;
- забезпечувати спільну роботу з іншими навігаційними системами (INS, баровисотомір, одометри, радары, лідари, візуальна навігація).

Різні носії висувають специфічні вимоги до GNSS-обладнання. Далі узагальнено матеріали робіт [25–36] щодо специфіки застосування GNSS на різних платформах.

БПЛА. Малогабаритні дрони потребують легких та доступних приймачів. Часто використовуються комерційні модулі (напр. U-Blox) з підтримкою GPS, проте військові БПЛА обладнуються більш захищеними системами. Для ударних БПЛА критичною є стійкість до РЕБ. На російських «Орлан-10» певний час встановлювали прості GPS/ГЛОНАСС-модулі типу U-Blox M8 і вони були уразливими до радіоелектронних перешкод [35]. Натомість в БПЛА, які використовують українські Сили оборони та військові підрозділи країн-партнерів, впроваджують заходи проти подавлення – від переходу на інерціальну навігацію при втраті сигналу до встановлення малогабаритних заводо захищених антен. Як приклад, згадана вище GAJT-310 може встановлюватися на тактичні БПЛА, забезпечуючи прийом сигналів навіть при наявності перешкод [36]. Іранські БПЛА Shahed-136 (рос. «Герань-2»), що масово застосовуються рф, спершу були вразливими до подавлення GPS, однак новіші модифікації отримали покращений приймач «Nasir» та антену з 4-ма елементами [36]. Також застосовувались варіанти Shahed з 8-елементною круговою антенною решіткою китайського походження, що свідчить про впровадження інших типів CRPA на цих БПЛА.

Крилаті ракети, керовані бомби і снаряди. Ці платформи рухаються на високих швидкостях і часто на далекі відстані, тому інтегрують INS разом із GNSS. Антени зазвичай пласкі та встановлені на верхній частині корпусу носія. Наприклад, американські авіаційні бомби JDAM мають невелику антену в хвостовому блоці. У сучасній війні рф–Україна з'ясувалося, що боєприпаси для M142 HIMARS та M982 Excalibur з на-

вігацією на базі GPS можуть втрачати точність під дією російських засобів РЕБ. Відомо, що точність 155-мм снарядів Excalibur впала з ~70 % до лише 6 % влучань після кількох тижнів пристосування РЕБ противника [37, 40]. У відповідь США терміново модифікували JDAM із наведенням GPS для України, додавши до них режим самонаведення на джерело випромінювання перешкод [38, 41]. Спеціальний сенсор вловлює сигнал ворожого засобу РЕБ і скеровує бомбу в цю точку, перетворюючи РЕБ на мішень. Таким чином, отримують можливість ураження засобів РЕБ з пасивним наведенням.

Військові літаки. Авіація НАТО з початку 2000-х років має доступ до точної навігації – як через GPS, так і наземні системи типу eLORAN. Антени на літаках можуть бути як всеспрямованими (декілька по фюзеляжу для кругового огляду), так і спрямованими (наприклад, встановлюватись у носі – для прийому диференційних сигналів від супутників зв'язку). Сучасні винищувачі обладнуються захищеними багаточастотними приймачами. Так, F-35 має вбудований модуль GNSS з М-кодом. Антенні системи літака можуть включати кілька елементів для реалізації антенного рознесення і боротьби з перешкодами (як правило, інтегровані у верхню поверхню планера) [38].

Кораблі і морські платформи. На флоті GNSS використовується не лише для навігації, а й для синхронізації часу радіоелектронної апаратури. Корабель може нести одразу декілька GNSS-приймачів різного призначення. Відкриті палуби дозволяють встановлювати громіздкі антени – в тому числі адаптивні. Зазначена вище система GAJT-710MS якраз позиціонується для флоту – вона вміщує 7-елементну антену і блок радіоелектронного подавлення в одному куполі, стійкому до морських умов [44, 45]. Вона забезпечує безперервну навігацію корабля навіть поблизу зон активних радіоелектронних перешкод, забезпечуючи захищений прийом супутникових сигналів. Окрім GNSS, військові кораблі мають інерціальні системи високої точності та астрономічні навігаційні системи як резервні.

Наземна техніка. Танки, БМП, автомобілі оснащуються GNSS для навігації та бойового управління (зокрема, в системах типу «digital battlefield»). Через відносну близькість до лінії фронту, ці приймачі часто зазнають впливу РЕБ. Типовий захід – встановлення на бронетехніку антен із заводо захищеними модулями. Нерідко застосовуються приймачі у комплекті з антиспуфінговими антенами, наприклад, в російських військах помічено переносні навігаційні прилади «Оріон» від КБ «Навіс» – ручні ГЛОНАСС/GPS навігатори, які, за заявами, є «секретними» і стійкішими до РЕБ. Один із таких приладів був захоплений СБУ в 2022 році у російському десантному підрозділі під Миколаєвом [44]. Він містив критичні дані маршрутів, що свідчить про використання таких пристроїв для координації наступу. Сили оборони України наразі отримують численні засоби навігації виробництва країн-партнерів – від звичайних комерційних GPS-приймачів для авто до високоточних диференційних приймачів для артилерійських систем. Зокрема, високоточні системи типу HIMARS використовують GPS військового призначення з шифруванням, але як

показав досвід, вони потребують додаткового захисту від подавлення на рівні антени або тактичних прийомів (зміна траєкторії, швидке відпрацювання залпу до того, як ворог застосує радіоелектронне подавлення).

Бойова ефективність та досвід

Реальні бойові дії останніх десятиліть підтвердили критичність стійкості GNSS-обладнання. У війні на сході України та під час широкомасштабного вторгнення 2022–2026 рр. російські сили активно застосовують РЕБ для подавлення GPS-приймачів на БпЛА і високоточних снарядах [37]. Як згадувалося, це призвело до випадків зниження точності західних озброєнь. У відповідь ЗСУ вдосконалюють тактику застосування озброєнь – удари по РЕБ, зміна маршрутів БпЛА і модернізують обладнання. Зокрема, американські JDAM-ER, надані Україні, отримали апаратні доопрацювання – систему самонаведення на джерело перешкод, що вже показала успіхи у випробуваннях [41, 42].

З іншого боку, російська військова техніка також страждає від залежності від GNSS. Відомо про випадки, коли БпЛА «Орлан-10» некоректно поверталися і були втрачені через подавлення навігації. РФ намагається компенсувати це, впроваджуючи комплексну навігацію (ГЛОНАСС + інерціальна система), використовуючи наземні РСДН (системи типу «Чайка») як резерв, а також нові алгоритми типу поєднання сигналів кількох систем (GLONASS, GPS, Galileo). Проте західні спостерігачі відзначають, що загалом GNSS-війна в Україні стала першим масштабним зіткненням засобів РЕБ і навігаційних систем. Кожна сторона швидко адаптується. З'явилися імпровізовані екрани і фільтри для антен, використання БпЛА на наднизьких висотах, рознесення частот тощо [35, 36].

Отже, ефективність СНС-обладнання на полі бою визначається тим, наскільки добре воно захищене від типових загроз РЕБ. Сучасні професійні приймачі з завадостійкими антенами значно підвищують шанси зберегти навігацію: наприклад, американські системи з M-code у поєднанні з CRPA-антенами можуть працювати під впливом комплексів РЕБ «Житель» і «Поле-21», тоді як GPS приймачі цивільного використання повністю «сліпнуть» у тій зоні [37]. Важливо також мати резерв – інерціальні системи, оптичні датчики (у деяких БпЛА останніх модифікацій присутні відеосистеми для навігації за місцевістю).

В подальшому зупинимось на аналізі ефективності використання GNSS у бойових діях на сході України.

GNSS стали критично важливим елементом російсько-української війни. Точність визначення координат, синхронізація часу та навігаційні функції прямо впливають на ефективність БпЛА, артилерії, ракетних систем, морських платформ та кораблів, а також наземної техніки з НПК включно.

Зокрема, слід зазначити, що GNSS забезпечує зменшення витрат боєприпасів за рахунок підвищення точності ураження, прискорення циклу «розвідка-удар» та можливості точного ураження цілей у глибині оборони противника. Завдяки GNSS ЗСУ здійснювали точні удари по складах боєприпасів, командним пунктам та логістичним вузлам противника. Масоване застосування БпЛА

в поєднанні з GNSS дозволили Силам оборони Україні створити ефективну розвідку в режимі реального часу.

У той же час, як згадувалося вище, противник активно застосовує комплекси РЕБ з системами GPS-спуфінгу. В зоні бойового зіткнення РЕБ противника є особливо насиченим і це суттєво впливає на бойові можливості підрозділів ЗСУ, залежних від GNSS.

Підрозділи РЕБ та РЕП ЗСУ активно виявляють станції РЕБ противника, які протидіють GNSS та які знищуються Силами оборони України за допомогою артилерії та БпЛА. Україна масово створює власні системи РЕБ, зокрема портативні, які подавляють канали управління та навігації БпЛА, створюючи свої «зони без GNSS» для ворожої техніки.

Останні два роки розвивається тенденція до рішень, менш залежних від GNSS.

Українські компанії розробляють автономні системи візуальної навігації, які дозволяють БпЛА орієнтуватись у польоті за рельєфом місцевості, без GNSS і зберігати точність навіть при дії потужного РЕБ [48].

Для ракет розробляються гібридні системи на основі INS з оптичною або радарною корекцією у купі з захищеною СНС.

В умовах впливу радіоелектронного подавлення FPV-дрони можуть переходити на використання INS, доповненої управлінням по візуальному каналу з використанням оптоволоконного зв'язку та оптико-кореляційних систем. GNSS показала високу бойову ефективність лише до моменту насичення противником сучасною РЕБ. GNSS є важливою технологією, але не самодостатньою. GNSS має бути інтегрованою з INS, оптичною, радіолокаційною та іншою навігацією. Ключем до збереження переваги над противником є подальший розвиток автономної навігації [48].

Україна, як держава, що веде сучасну війну, потребує власної системи забезпечення навігаційної стійкості. У нормативно-правових актах органів державної влади України [44–47] визначено актуальні проблеми в цій сфері та окреслено основні напрями її розвитку. Однак, незважаючи на схвалення розпорядженням Кабінету Міністрів України від 03.01.2013 № 1-р Концепції проекту Закону України «Про державне регулювання у сфері супутникової навігації» [45], сам Закон досі не прийнятий.

Виклики

Основні проблеми – активні дії РЕБ противника, обмежені ресурси на дослідження та ДКР, залежність антенних компонентів від імпорту.

За результатами проведеного у статті аналізу GNSS можна виокремити такі ключові аспекти їх розвитку:

1. Точність і чутливість. Сучасні GNSS-приймачі досягли високої точності (метрової і кращої) завдяки багаточастотності та обробці диференційних поправок. Ранні покоління приймачів характеризувались точністю на рівні десятків метрів і нижчою чутливістю до сигналів. В умовах бойових перешкод точність визначається спроможністю приймачів отримати достовірну інформацію хоча б з однієї СНС – тут мають перевагу приймачі, що можуть використати кілька діапазонів і систем. Досвід показав, що односистемні рішення (тільки GPS) вразливіші.

2. Стійкість до РЕБ. Це головний виклик сьогодення. Найбільшу стійкість мають приймачі військового призначення із захищеними сигналами (напр. GPS P(Y), M-code, Galileo PRS) у поєднанні з адаптивними антенами. Вони здатні витримувати десятки децибел завадового сигналу. Без таких заходів точна зброя втрачає ефективність (як було з Excalibur до модернізації). Таким чином, у конкурентній боротьбі «перешкода та приймач» нині перемагають ті системи, які закладають у конструкцію протидію спуфінгу та перешкодам і навіть контрзаходи (наведення на джерело перешкоди).

3. Габарити, вага, енергоспоживання. Ранні версії GPS приймачів вагою 1–2 кг замінено на модулі по 0,4–0,5 кг або й десятки грам. Це дозволило масово оснастити солдатів і БпЛА навігацією. Антени із адаптивним фільтром від завад поки що додають вагу (кількасот грамів для малого БпЛА, до кількох кг для техніки), але можливі і адаптивні антени (наприклад, 3-х або 4-х елементні рішення для БпЛА). Енергоспоживання теж оптимізовано: сучасні приймачі споживають 0,5–1 Вт, електроніка із забезпеченням фільтрації завад – кілька ват, що прийнятно для більшості платформ.

4. Адаптованість до платформ. Кожен тип носія отримав спеціалізоване рішення: для піхоти – легкі портативні GPS приймачі із швидким стартом і зручним інтерфейсом (DAGR, NavGuide); для бронетехніки – приймачі з інтерфейсами до бортової інформаційно-управляючої системи (БІУС) і можливістю під'єднання до зовнішніх антен; для БпЛА – модулі, що легко інтегруються в автопілот; для ракет – високодинамічні приймачі, що витримують перевантаження та малогабаритні антени, вмонтовані в корпус. Відповідно, існує взаємозамінність: наприклад, NavGuide може ставитися і на машину, і використовуватися піхотинцем. Гнучкість систем – одна з вимог сучасності. Українська практика – встановлення західних модулів на радянську техніку (для підвищення точності артилерії тощо) – демонструє, що компактні GNSS-рішення універсальні та легко адаптуються.

5. Бойове застосування. Реальні війни підтвердили ефективність тих систем, що мають багаторівневий захист і резерви. GNSS-приймачі, доповнені INS та адаптивними антенами, суттєво зберігають точність ударів навіть під тиском РЕБ. Натомість техніка, розрахована тільки на GPS цивільного застосування, зазнає значних втрат боєздатності в зоні конфлікту з потужним РЕБ. Український театр воєнних дій став полігоном для випробувань новітніх засобів: від російських засобів РЕБ до західних засобів гарантованого забезпечення позиціонування, навігації та синхронізації часу. Інвестиції в заводо захищені GNSS-антени і приймачі є критично необхідними для сучасної армії. Це підвищує стійкість управління військами, зменшує ризики втрати керування БпЛА та ракетами, збільшує точність вогневого ураження.

ВИСНОВКИ

GNSS стає не просто допоміжною технологією, а ключовим елементом управління сучасними бойовими системами. Військове майбутнє — це інтегровані системи позиціонування, навігації й часу, які залишаються стійкими навіть у середовищі із високим рівнем завад.

Для України критично важливо створити власну систему навігаційної стійкості на базі принципів інтеграції GNSS з інерціальними та оптичними системами під керуванням штучного інтелекту, розвивати антени з просторовим захистом та інтегруватись у мережеві стандарти НАТО.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Global Positioning System (GPS): Fact Sheet – 2024. URL: <https://www.spaceforce.mil/about-us/fact-sheets/article/2197765/global-positioning-system/> (дата звернення: 10.03.2026).
2. European GNSS (GALILEO) open service issue 2.0, January 2021 navigation solutions powered by Europe signal-in-space interface control document. URL: https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2021/01/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
3. Глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС): URL: https://gpsmobile.com.ua/ua/page/glonass.html?srsId=AfmBOp1inIkzLFAJts5E4Cxxxm__EPqmgmgJZHGTiFSGI5WvYFdjS (дата звернення: 10.03.2026).
4. Lu, J. (2020). Global Capabilities of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS). *Advances in Space Research*. Vol. 65. No. 1. Pp. 345—356. URL: <https://d-nb.info/1219381500/34> (дата звернення: 10.03.2026).
5. Sharma, S. & Singh, R. (2021). An Overview on the Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS/NavIC). *Intern. J. of Research Publication and Reviews*. Vol. 2. No. 10. Pp. 112—118. URL: <https://ijrpr.com/uploads/V2ISSUE10/IJRPR1542.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
6. Inaba, N., Matsumoto, A., Hase, H., Kogure, S., Sawabe, M. & Terada K. (2009). Design Concept of Quasi-Zenith Satellite System. *Acta Astronautica*. Vol. 65. No. 7—8. Pp. 1068—1075.
7. Radionerds. A step-by-step introduction to the AN/PSN-11 PLGR / RN-training manual. URL: https://radionerds.com/images/7/76/The_PLGR_Primer.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
8. AN/ASN-163 and AN/PSN-11 GPS Receivers Rockwell Collins GPS Test Report. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA416592.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
9. Short manual GPS receiver Dagr URL: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?l=russian&id=3140921708> (дата звернення: 10.03.2026).
10. Водяних А.А., Тимчук В.Ю. Технічна характеристика навігаційної апаратури СН-3003М «Базальт». Військово-технічний збірник. 2011. № 4. URL: <https://vtz.asv.gov.ua/article/view/174988> (дата звернення: 17.11.2025).
11. Каталог продукції ГП «Укроборонпром». Приймач СН-3003М. URL: <https://orizon-navigation.ua/ru/product/aparatura-nazemnogo-priznachennya/sn-3003m-2/> (дата звернення: 17.11.2025).
12. Настанова «Використання навігаційних засобів в Збройних Силах України» : URL: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/2_%D0%92%D0%9A%D0%94%D0%9F-10-15403.01-%D0%9D%D0%90%D0%A1-%D0%92%D0%98%D0%9A-%D0%A1%D0%A3%D0%9F-%D0%97%D0%90%D0%A1-

- % D 0 % 9 D % D 0 % 9 0 % D 0 % 9 2 - % D 0 % 9 2 - % D 0 % 9 7 % D 0 % A 1 % D 0 % A 3 .pdf (дата звернення: 10.03.2026).
13. Bartock, M., et al. NIST IR 8323r1: Foundational PNT Profile: Applying the Cybersecurity Framework for the Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Services. January, 2023. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2023/NIST.IR.8323r1.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
 14. NovAtel. How to evaluate anti-jamming and anti-spoofing technology: URL: <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/resources/how-to-evaluate-anti-jamming-and-anti-spoofing-technology> (дата звернення: 10.03.2026).
 15. Best Practices for Resilient PNT Supporting Critical Infrastructure: URL: https://www.dhs.gov/sites/default/files/2025-02/25_0220_st_pnt_best_practices_ci.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 16. Safran Navigation & Timing. An Engineer's Guide to CRPA Testing : URL: <https://safran-navigation-timing.com/an-engineers-guide-to-crpa-testing/> (дата звернення: 10.03.2026).
 17. Borio, D. Tracking and Mitigating a Jamming Signal with an Adaptive Notch Filter: URL: <https://www.insidegnss.com/auto/marapr14-WP.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
 18. European Union (GSC/Europe). Galileo OSNMA Service Definition Document (SDD). 2025: URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OSNMA-SDD_v1.0.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 19. Montgomery, P.Y., Humphreys, T.E. & Ledvina, B.M. (2011). Receiver-Autonomous Spoofing Detection: Experimental Results of a Multi-Antenna Receiver Defense Against a Portable Civil GPS Spoofer. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstreams/0eb5f718-e142-4ff9-b233-b117547757fe/download> (дата звернення: 10.03.2026).
 20. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. April, 2020: URL: <https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/2020-SPS-performance-standard.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
 21. The Galileo PRS: URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/GSA_PRS_150209.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 22. U.S. Department of Defense. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces (IS-GPS-200L). August, 2020: URL: https://navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/gps/IS_GPS_200L.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 23. Bartock, M. et al. NIST IR 8323r1: Foundational PNT Profile: Applying the Cybersecurity Framework for the Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Services. January, 2023. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2023/NIST.IR.8323r1.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
 24. U.S. Department of Defense. Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard. September, 2007. URL: <https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/2007-PPS-performance-standard.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
 25. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard. Beijing. 2023. 82 p. <http://m.beidou.gov.cn/xt/gfxz/202105/P020210526216231136238.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
 26. NaviC signal in space icd for standard positioning service in L1 frequency. 2022. URL: https://www.isro.gov.in/media_isro/pdf/SatelliteNavigation/Draft_NavIC_SPS_ICD_L1_Oct_2022.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 27. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). QZSS Performance Standard. Tokyo. 2021. 110 p.
 28. Глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС). URL: <https://gpsmobile.com.ua/ua/page/glonass.html?srsltid=AfmBOoq2Kg2tI2wd5GLgyp3nIKO5Y9oOCbz2v3OrsJqUlcROWwoC1HEB> (дата звернення: 10.03.2026).
 29. Joint Direct Attack Munition (JDAM). URL: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2166820/joint-direct-attack-munition-jdam/> (дата звернення: 10.03.2026).
 30. Joint Air-to-Surface Standoff Missile (JASSM) FY 2024 President's Budget. URL: https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading%20Room/Selected_Acquisition_Reports/FY_2022_SARS/JASSM-ER_SAR_DEC_2022.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 31. US Navy. Tomahawk Weapons System Overview. Washington, D.C.: US Navy. 2021. URL: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2169229/tomahawk-cruise-missile/> (дата звернення: 10.03.2026).
 32. Galileo open service definition document (OS SDD). Iss. 1.3. November, 2023. URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.3.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 33. Development of BeiDou Navigation Satellite System. URL: https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2024/Technical_Presentations/25/4_item_9_Development_of_BeiDou_Navigation_Satellite_System_LU_Jun_20240617CUPUOS-67.pdf (дата звернення: 10.03.2026).
 34. Керована авіаційна бомба КАБ-500. URL: <https://engage.org.ua/shho-take-kab-kerovana-aviacziyna-bomba-u-vsiih-detalyah/> (дата звернення: 24.04.2026).
 35. Russian Orlan-10 drone jammed by Ukrainian electronic warfare ... /7/. URL: <https://informnapalm.org/en/russian-orlan-10-drone-jammed-by-ukrainian-electronic-warfare-assets/> (дата звернення: 10.03.2026).
 36. З камерою і штучним інтелектом: розвідка оприлюднила дані про новий іранський Shahed-136. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/4008847-z-kamerou-i-stucnim-intelektom-rozvidka-opriludnila-dani-pro-novij-iranskij-shahed136.html> (дата звернення: 10.03.2026).
 37. Blunting Excalibur's edge. URL: <https://euro-sd.com/2024/07/articles/39533/blunting-excaliburs-edge/> (дата звернення: 10.03.2026).
 38. Will Be Equipped With Home-On GPS Jam Seekers – The Aviationist. URL: <https://theaviationist.com/2024/05/06/ukrainian-jdam-er-with-home-on-gps-jam-seekers/> (дата звернення: 10.03.2026).
 39. Ефективність снарядів Excalibur впала з 55 % до 6 %, а вартість успішного ним ураження для ЗСУ зросла в шість разів – WP та NYT. Forbes.ua. URL: [https://forbes.ua/news/efektivnist-snaryadiv-excalibur-vpala-z-55-do-](https://forbes.ua/news/efektivnist-snaryadiv-excalibur-vpala-z-55-do-6-ua/news/efektivnist-snaryadiv-excalibur-vpala-z-55-do-)

- 6-vartist-uspishnogo-nim-urazhennya-dlya-zsu-zroslav-shist-raziv-washington-post-ta-the-new-york-times-28052024-21428 (дата звернення: 10.03.2026).
40. Defense Express (травень 2024). США готують Україні JDAM-ER із ГСН, які зможуть бити по рашистським РЕБ. URL: https://defence-ua.com/news/ssha_gotujut_ukrajini_jdam_er_iz_gsn_jaki_zmozhut_bitu_po_rashistskim_reb-15233.html (дата звернення: 10.03.2026).
41. GAJT-310 Anti-Jam Antenna. Anti-jam antenna with integrated or flexible form factor options. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/novatel/gajt-310-anti-jam-antenna> (дата звернення: 10.03.2026).
42. GAJT-710MS anti-jam antenna. NovAtel URL: <https://novatel.com/products/anti-jam-antenna-systems-gajt/gajt-710ms-anti-jam-antenna> (дата звернення: 10.03.2026).
43. SBU received a secret russian GPS-navigator: with offensive plans – LB.ua news portal. URL: https://en.lb.ua/news/2022/03/09/10521_sbu_received_secret_russian.html (дата звернення: 10.03.2026).
44. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 23 грудня 2022 року «Про заходи з розвитку та використання вітчизняних систем супутникової навігації в інтересах безпеки і оборони держави»: Указ Президента України від 23.12.2022 № 884/2022. Урядовий кур'єр. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/884/2022> (дата звернення: 10.03.2026).
45. Про схвалення Концепції проекту Закону України «Про державне регулювання у сфері супутникової навігації»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 03.01.2013 № 1-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1-2013-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.03.2026).
46. Деякі питання державного регулювання у сфері супутникової навігації: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.09.2009 № 959. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/959-2009-%D0%BF#Text> (дата звернення: 10.03.2026).
47. Про затвердження Положення про державну мережу моніторингу глобальних навігаційних супутникових систем і Програми забезпечення функціонування і розвитку державної мережі моніторингу глобальних навігаційних супутникових систем на період до 2010 року: Постанова Кабінету Міністрів України від 14.04.2004 № 470. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/470-2004-%D0%BF#Text> (дата звернення: 10.03.2026).
48. Liga.net. Українські дрони зможуть працювати без GPS – виробник. URL: <https://news.liga.net/ua/all/news/ukrainski-drony-zmozhut-pratsiuvaty-bez-gps-vyrobnik> (дата звернення: 10.03.2026).
3. “Globalna navigatsiina suputnykova systema (GLONASS)” [Global Navigation Satellite System (GLONASS)] URL: https://gpsmobile.com.ua/ua/page/glonass.html?srsltid=AfmBOoplInIkzLFAJts5E4Cxxm__EPqmggJZHgtiFSGlf5WnvYFdjS (accessed: 10.03.2026).
4. Lu, J. (2020). Global Capabilities of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS). *Advances in Space Research*. Vol. 65. No. 1. Pp. 345—356. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.034> (accessed: 10.03.2026).
5. Sharma, S. & Singh, R. (2021). An Overview on the Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS/NavIC). *Intern. J. of Research Publication and Reviews*. Vol. 2. No. 10. Pp. 112—118. URL: <https://ijrpr.com/uploads/V2ISSUE10/IJRPR1542.pdf> (accessed: 10.03.2026).
6. Inaba, N., Matsumoto, A., Hase, H., Kogure, S., Sawabe, M. & Terada K. (2009). Design Concept of Quasi-Zenith Satellite System. *Acta Astronautica*. Vol. 65. No. 7—8. Pp. 1068—1075.
7. Radionerds. A step-by-step introduction to the AN/PSN-11 PLGR / RN-training manual. URL: https://radionerds.com/images/7/76/The_PLGR_Primer.pdf (accessed: 10.03.2026).
8. AN/ASN-163 and AN/PSN-11 GPS Receivers Rockwell Collins GPS Test Report. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA416592.pdf> (accessed: 10.03.2026).
9. Short manual GPS receiver Dagr URL: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?l=russian&id=3140921708> (accessed: 10.03.2026).
49. Vodianykh, A.A. & Tymchuk, V.Yu. (2011). “Tekhnichna kharakterystyka navigatsiinoi aparatury CH-3003M «Bazalt»” [Technical characteristics of the navigation equipment SN-3003M «Basalt»]. *Military Technical Coll.* No. 4 URL: <https://vtz.asv.gov.ua/article/view/174988> (accessed: 17.11.2025).
10. “Katalog produkty DP «Ukroboronprom». Pryimach SN-3003M” [Product catalog of the State Enterprise «Ukroboronprom». Receiver SN-3003M]. URL: <https://orizon-navigation.ua/ru/product/aparatura-nazemnogo-priznachennya/sn-3003m-2/> (accessed: 17.11.2025).
11. “Nastanova «Vykorystannia navigatsiinykh zasobiv v Zbroinykh Sylakh Ukrainy»” [Guidelines for the Use of Navigation Equipment in the Armed Forces of Ukraine]: URL: https://sprotvyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/2_%D0%92%D0%9A%D0%94%D0%9F-10-15403.01-%D0%9D%D0%90%D0%A1-%D0%92%D0%98%D0%9A-%D0%A1-%D0%A3%D0%9F-%D0%97%D0%90%D0%A1-%D0%9D%D0%90%D0%92-%D0%92-%D0%97%D0%A1%D0%A3.pdf (accessed: 06.03.2026).
12. Bartock, M., et al. NIST IR 8323r1: Foundational PNT Profile: Applying the Cybersecurity Framework for the Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Services. January, 2023. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2023/NIST.IR.8323r1.pdf> (accessed: 10.03.2026).
13. NovAtel. How to evaluate anti-jamming and anti-spoofing technology: URL: <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/resources/how-to-evaluate-anti-jamming-and-anti-spoofing-technology> (accessed: 10.03.2026).

REFERENCES

- Global Positioning System (GPS): Fact Sheet – 2024. URL: <https://www.spaceforce.mil/about-us/fact-sheets/article/2197765/global-positioning-system/> (accessed: 10.03.2026).
- European GNSS (GALILEO) open service issue 2.0, January 2021 navigation solutions powered by Europe signal-in-space interface control document. URL: https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2021/01/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf (accessed: 10.03.2026).

14. Best Practices for Resilient PNT Supporting Critical Infrastructure: URL: https://www.dhs.gov/sites/default/files/2025-02/25_0220_st_pnt_best_practices_ci.pdf (accessed: 10.03.2026).
15. Safran Navigation & Timing. An Engineer's Guide to CRPA Testing : URL: <https://safran-navigation-timing.com/an-engineers-guide-to-crpa-testing/> (accessed: 10.03.2026).
16. Borio, D. Tracking and Mitigating a Jamming Signal with an Adaptive Notch Filter: URL: <https://www.insidegnss.com/auto/marapr14-WP.pdf> (accessed: 10.03.2026).
17. European Union (GSC/Europe). Galileo OSNMA Service Definition Document (SDD). 2025: URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OSNMA-SDD_v1.0.pdf (accessed: 10.03.2026).
18. Montgomery, P.Y., Humphreys, T.E. & Ledvina, B.M. (2011). Receiver-Autonomous Spoofing Detection: Experimental Results of a Multi-Antenna Receiver Defense Against a Portable Civil GPS Spoofer. URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstreams/0eb5f718-e142-4ff9-b233-b117547757fe/download> (accessed: 10.03.2026).
19. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. April, 2020: URL: <https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/2020-SPS-performance-standard.pdf> (accessed: 10.03.2026).
20. The Galileo PRS: URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/GSA_PRS_150209.pdf (accessed: 10.03.2026).
21. U.S. Department of Defense. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces (IS-GPS-200L). August, 2020: URL: https://navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/gps/IS_GPS_200L.pdf (accessed: 10.03.2026).
22. Bartock, M. et al. NIST IR 8323r1: Foundational PNT Profile: Applying the Cybersecurity Framework for the Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Services. January, 2023. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2023/NIST.IR.8323r1.pdf> (accessed: 10.03.2026).
23. U.S. Department of Defense. Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard. September, 2007. URL: <https://www.gps.gov/sites/default/files/2025-07/2007-PPS-performance-standard.pdf> (accessed: 10.03.2026).
24. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard. Beijing, 2023. 82 p. <http://m.beidou.gov.cn/xt/gfzx/202105/P020210526216231136238.pdf> (accessed: 10.03.2026).
25. NaviC signal in space icd for standard positioning servic in L1 frequency. 2022. URL: https://www.isro.gov.in/media_isro/pdf/SateliteNavigation/Draft_NavIC_SPS_ICD_L1_Oct_2022.pdf (accessed: 10.03.2026).
26. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). QZSS Performance Standard. Tokyo. 2021. 110 p.
27. Globalna navigatsiina sputnykova systema (GLONASS)” [Global Navigation Satellite System (GLONASS)] URL: https://gpsmobile.com.ua/ua/page/lonass.html?srsItd=AfmBOoplInIkzLFAJts5E4Cxxm__EPqgmggJZHGTiFSGlf5WnvYFdjS (accessed: 10.03.2026).
28. Joint Direct Attack Munition (JDAM). URL: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2166820/joint-direct-attack-munition-jdam/> (accessed: 10.03.2026).
29. Joint Air-to-Surface Standoff Missile (JASSM) FY 2024 President's Budget. URL: https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading%20Room/Selected_Acquisition_Reports/FY_2022_SARS/JASSM-ER_SAR_DEC_2022.pdf (accessed: 10.03.2026).
30. US Navy. Tomahawk Weapons System Overview. Washington, D.C.: US Navy. 2021. URL: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2169229/tomahawk-cruise-missile/> (accessed: 10.03.2026).
31. Galileo open service definition document (OS SDD). Iss. 1.3. November, 2023. URL: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.3.pdf (accessed: 10.03.2026).
32. Development of BeiDou Navigation Satellite System. URL: https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/2024/Technical_Presentations/25/4_item_9_Development_of_BeiDou_Navigation_Satellite_System_LU_Jun_20240617CUPUOS-67.pdf (accessed: 10.03.2026).
33. “Kerovana aviatsiina bomba KAB-500” [KAB-500 guided aviation bomb]. URL: <https://engage.org.ua/shho-take-kab-kerovana-aviaczijna-bomba-u-vsih-detalyah/> (accessed: 24.04.2026).
34. Russian Orlan-10 drone jammed by Ukrainian electronic warfare ... /7/. URL: <https://informnapalm.org/en/russian-orlan-10-drone-jammed-by-ukrainian-electronic-warfare-assets/> (accessed: 10.03.2026).
35. “Z kamerou i shtuchnym intelektom: rozvidka opry-ljudnyla dani pro novyi iranskyi Shahed-136” [War & Sanctions Reveals Components of Upgraded Iranian Shahed-136 Drone with Camera and AI]. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/4008847-z-kamerou-i-stuchnim-intelektom-rozvidka-opriludnyla-dani-pro-novij-iranskij-shahed136.html> (accessed: 10.03.2026).
36. Blunting Excalibur's edge. URL: <https://euro-sd.com/2024/07/articles/39533/blunting-excaliburs-edge/> (accessed: 10.03.2026).
37. Will Be Equipped With Home-On GPS Jam Seekers – The Aviationist. URL: <https://theaviationist.com/2024/05/06/ukrainian-jdam-er-with-home-on-gps-jam-seekers/> (accessed: 10.03.2026).
38. “Efektyvnist snariativ Excalibur vpala z 55 % do 6 %, a vartist uspishnogo nym urazhennia dlia ZSU zrosla v shist raziv – WP ta NYT” [The effectiveness of Excalibur shells fell from 55% to 6%, and the cost of a successful strike for the Armed Forces of Ukraine increased sixfold – WP, NYT]. Forbes.ua. URL: <https://forbes.ua/news/efektivnist-snaryativ-excalibur-vpala-z-55-do-6-vartist-uspishnogonim-urazhennya-dlya-zsu-zrosla-v-shist-raziv-washington-post-ta-the-new-york-times-28052024-21428> (accessed: 10.03.2026).
39. Defense Express (May, 2024). “SSHA gotuiut Ukraini JDAM-ER iz GSN, yaki zmozhut byty po rashystskim REB” [The US is preparing JDAM-ER with homing missiles for Ukraine, which will be able to hit rashist EWS]. URL: https://defence-ua.com/news/ssha_gotujut_ukrajini_

- jdarn_iz_gsn_jaki_zmozhot_biti_po_rashistskim_reb-15233.html (accessed: 10.03.2026).
40. [GAJT-310 Anti-Jam Antenna. Anti-jam antenna with integrated or flexible form factor options]. URL: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/novatel/gajt-310-anti-jam-antenna> (accessed: 10.03.2026).
 41. GAJT-710MS anti-jam antenna. NovAtel URL: <https://novatel.com/products/anti-jam-antenna-systems-gajt/gajt-710ms-anti-jam-antenna> (accessed:10.03.2026).
 42. SBU received a secret russian GPS-navigator: with offensive plans – LB.ua news portal. URL: https://en.lb.ua/news/2022/03/09/10521_sbu_received_secret_russian.html (accessed: 10.03.2026).
 43. “Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 23 grudnia 2022 roku «Pro zakhody z rozvytku ta vykorystannia vitchyznianskykh system suputnykovoï navigatsii v [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated December 23, 2022 «On measures for the development and use of domestic satellite navigation systems in the interests of state security and defense»: Decree of the President of Ukraine dated December 23, 2022, No. 884/2022]. Government Courier. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/884/2022> (accessed: 10.03.2026).
 44. “Pro skhvalennia Kontseptsii proektu Zakonu Ukrainy «Pro derzhavne reguliuvannia u sferi suputnykovoï navigatsii»: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainu vid 03.01.2013 № 1-p»” [On approval of the Concept of the Draft Law of Ukraine «On State Regulation in the Field of Satellite Navigation»: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated January 3, 2013, No. 1]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1-2013-%D1%80#Text> (accessed: 10.03.2026).
 45. “Deiaki pytannia derzhavnogo reguliuvannia u sferi suputnykovoï navigatsii. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainu vid 09.09.2009 № 959” [Certain issues of state regulation in the field of satellite navigation: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 959 dated September 9, 2009]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/959-2009-%D0%BF#Text> (accessed: 10.03.2026).
 46. “Pro zatverdzhennia Polozhennia pro gerzhavnu merezhu minitoryngu globalnykh navigatsiinykh suputnykovykh system i Programy zabezpechennia funktsionuvannia i rozvytku derzhavnoi merezhi monitoryngu globalnykh navigatsiinykh suputnykovykh system na period do 2010 roku: postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 14.04.2004 № 470” [On approval of the Regulations on the state network for monitoring global navigation satellite systems and the Program for ensuring the functioning and development of the state network for monitoring global navigation satellite systems for the period up to 2010: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 470 dated April 14, 2004]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/470-2004-%D0%BF#Text> (accessed: 10.03.2026).
 47. “Liga.net. Ukrainski drony zmozhot pratsiuvaty bez GPS – vyrobnyk” [Liga.net. Ukrainian drones will be able to operate without GPS – manufacturer]. URL: <https://news.liga.net/ua/all/news/ukrainski-drony-zmozhot-pratsiuvaty-bez-gps-vyrobnyk> (accessed: 10.03.2026).

Dovhopoly A.S., Biloborodov O.O., Petruk S.M., Panteleiev S.B.

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF SATELLITE NAVIGATION TECHNOLOGIES IN THE MILITARY SPHERE

The authors propose a series of articles devoted to the analysis of satellite navigation systems and the prospects for their use in the armament system of the Armed Forces of Ukraine. The first of them analyzes the application of satellite navigation technologies in the military sphere. The second article will be devoted to the analysis of the main satellite receivers and antennas and the development of recommendations for their use in domestic satellite navigation systems. The third article will analyze the structure of errors of satellite navigation systems and study the main factors that determine the accuracy of the parameters of these systems and the conditions for the occurrence of their blackouts.

The article analyzes trends in the development of navigation receivers: from the first GPS to multi-system structures.

It shows that satellite navigation systems have become one of the most important elements of modern military technology, and achieving navigational superiority is becoming a critical factor in military success, providing an advantage in response time, strike accuracy, and combat coordination.

An overview of global satellite navigation systems is provided, and their advantages and disadvantages are analyzed.

The basic requirements for military satellite navigation systems are identified. Methods of combating interference with satellite navigation are analyzed, in particular using anti-jamming and anti-spoofing technologies.

A comparative analysis of the capabilities of military and civilian satellite navigation systems was conducted. The importance of taking into account the specifics of the use of satellite navigation systems on different combat platforms was noted.

Based on the results of the analysis of satellite navigation systems conducted in the article, key aspects of their development are highlighted.

It is concluded that it is critically important for Ukraine to create its own navigation stability system based on the principles of GNSS+INS+AI (satellite navigation systems + inertial systems + artificial intelligence), develop antennas with spatial protection, and integrate into NATO network standards.

Keywords: *satellite navigation systems, global satellite systems, GPS, GLONASS, Galileo, providing troops with navigation information, anti-jam/anti-interference of satellite navigation systems, anti-spoofing.*

Відомості про авторів:

Довгополий Анатолій Степанович

доктор технічних наук, професор
головний науковий співробітник

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України

м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9227-9771>

Білобородов Олег Олександрович

доктор технічних наук, старший дослідник
начальник науково-дослідного відділу
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>

Петрук Сергій Миколайович

кандидат технічних наук, старший дослідник
Начальник науково-дослідного відділу – заступник
начальника науково-дослідного управління
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9644-1550>
E-mail: petruksn@ukr.net

Пантелєєв Сергій Борисович

науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-2895-388X>

Information about the authors:

Anatoly Dovhopoly

Doctor of Technical Sciences, Professor
Principal Researcher

Central Scientific Research Institute of Armament
and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9227-9771>

Oleh Biloborodov

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
Head of Scientific Research Department
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>

Serhii Petruk

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Head of Scientific Research Department - Deputy Head of
Scientific Research Directorate
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9644-1550>
E-mail: petruksn@ukr.net

Serhii Panteleiev

Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-2895-388X>

Стаття надійшла до редколегії 25.03.2026

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 656.052

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).87-95](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).87-95)**С. І. САЩУК**<https://orcid.org/0000-0002-7246-9110>**В. І. СЛЮСАР**, доктор технічних наук, професор<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>**З. К. ШЕЛЕМІН**<https://orcid.org/0009-0006-7740-2245>**К. В. ДРОГОВОЗ**<https://orcid.org/0009-0002-8785-9805>*(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України, м. Київ)*

ТЕНДЕНЦІЇ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ЗМІН У ПРИЙМАЧАХ СИГНАЛІВ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИСОКОТОЧНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

У статті представлені результати проведених досліджень бортових навігаційних систем безпілотних літальних апаратів та ракет, які застосовувались рф проти України, на прикладі «Shahed-136» («Герань-2»), Х-32. Проаналізовано зміни, які відбувались у будові антенних систем та приймачах сигналів супутникових навігаційних систем. Досліджено тенденції подальшого розвитку перешкодозахищених навігаційних приймачів з малогабаритними адаптивними антенними решітками.

Ключові слова: навігаційна система, бортові системи, безпілотні літальні апарати (БпЛА), спуфінг, радіоелектронна боротьба.

ВСТУП

Тактика регулярного нанесення комбінованих авіаційних ударів рф з 2022 року супроводжується масованим застосуванням високоточних засобів повітряного нападу (ВЗПН), у тому числі «Shahed-136», також відомих як «Герань-2».

Зростання ролі радіоелектронної боротьби (РЕБ) в протидії ВЗПН спонукало противника удосконалювати перешкодозахищеність систем зв'язку та приймачів сигналів (ПС) супутникових радіонавігаційних систем (СРНС). Увага надається захисту ПС СРНС із застосуванням адаптивних антенних решіток, які постійно удосконалюються.

Під час проведених раніше досліджень було виявлено постійні конструктивні зміни ПС СРНС, тому визначена необхідність в проведенні аналізу тенденцій розвитку, технічних можливостей та особливостей функціонування перешкодозахищених навігаційних приймачів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У статті [1] розглядається використання імітаторів сузір'їв супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) для оцінки характеристик удосконалених методів захисту від перешкод та спуфінгу ПС СРНС, які використовують кілька антен в антенній решітці. У статті [2] представлені результати проведених досліджень конструктивних та функціональних особливостей «Комета-М». Визначено структуру побудови, призначення ключових компонентів. Досліджено технічні характеристики та особливості функціонування «Комета-М». У роботі [3] проведено аналіз тенденцій розвитку сучасних засобів радіоелектронного подавлення, джерел ненавмисних перешкод приймачам сигналів СРНС, наведені основні співвідношення, які дозволяють на основі інформації про параметри навігаційних сигналів розглянути критичні ситуації функціонування навігаційної апаратури. У статті [4] здійснюється оцінка потрібного рівня радіоелектронного захисту приймачів сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), що забезпечують застосування наземних платформ озброєння та військової техніки, з урахуванням можливого радіоелектронного подавлення з боку противника.

Метою статті є аналіз еволюційного розвитку та визначення тенденцій побудови ПС СРНС засобів повітряного нападу, зокрема БпЛА типу «Shahed-136», у яких застосовують антенні системи із контрольованою діаграмою спрямованості.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Надійність роботи ПС СРНС у зразках ВЗПН є критичною, але водночас вразливою до цілеспрямованих радіоелектронних впливів. Основними недоліками звичайних ПС є залежність від слабких сигналів супутників (типово $-160 \dots -130$ дБВт), чутливість до радіоелектронного подавлення та спуфінгу, а також відсутність просторового розділення джерел сигналів. За даними, наведеними у [5, 6], навіть малопотужні перешкоди, у діапазонах L1/L2, можуть повністю зірвати навігацію на відстанях у десятки кілометрів. Це обумовлює потребу в інтегрованих рішеннях просторової фільтрації, які формують нулі діаграми спрямованості в напрямках перешкод і зберігають корисний сигнал від супутників. Перші реалізації антени з контрольованою діаграмою направленості (Controlled reception pattern antennas – CRPA) забезпечували просторове придушення джерел завад до 25–30 дБ. Подальші дослідження показали, що збільшення кількості елементів лінійно розширює кількість ступенів свободи, тобто напрямків, у яких можна сформувати нулі діаграми спрямованості [7]. Це стало основним стимулом для розроблення систем із 7–16 елементами.

У сучасній практиці найменші CRPA містять 4 елементи – мінімум, необхідний для ефективного придушення однієї або двох спрямованих перешкод при збереженні сигналів супутників [8, 10]. Такі рішення застосовують у малих БпЛА, керованих боеприпасах, де критичні габарити і енергоспоживання. Системи середнього класу мають 7 або 8 елементів – це компроміс між продуктивністю та складністю калібрування. Для

стратегічних платформ і великих літальних апаратів розроблено масиви з 16 і навіть до 30 елементів, що дає змогу одночасно подавляти велику кількість джерел радіоелектронного випромінювання та компенсувати перевідбитий навігаційний сигнал (мультипас-ефект) [11].

Переваги багатоканальних CRPA очевидні: значне підвищення співвідношення потужності завади до сигналу (J/S), зниження ймовірності втрати фіксації навігаційного сигналу, стабільність трекінгу при наявності складного спектру перешкод [1]. Проте, зі зростанням кількості елементів збільшуються вимоги до фазової стабільності, точності калібрування, обчислювальних ресурсів і, як наслідок, вартості рішення. 16-елементна решітка потребує калібрування в умовах повної симуляції просторово-часових збурень і має ризик деградації через температурні й вібраційні впливи [8]. Досвід експлуатації, узагальнений у Inside GNSS, показує: без високоточної синхронізації фаз навіть великі масиви не забезпечують очікуваного придушення і можуть втратити перевагу над простими 4–7-елементними рішеннями [5].

Одним із ключових етапів еволюції антен із контрольованою діаграмою спрямованості стало створення компактних рішень, здатних забезпечувати рівень завадозахисту, порівняний із великими авіаційними системами. Прикладом таких розробок є результати, представлені у роботі NAVSYS Corporation «Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna» [11], де продемонстровано практичну реалізацію малої семиелементної CRPA (S-CRPA), орієнтованої на застосування в обмежених за простором платформах – ракетах і безпілотних літальних апаратах. Антена виконана у формі планарного кола діаметром близько 7 дюймів, із центральним елементом та шістьма пери-

ферійними, розташованими на відстані приблизно 0,45 λ між сусідніми центрами. Така геометрія забезпечує майже ізотропне покриття небесної півсфери та достатню кількість ступенів свободи для адаптивного формування нулів у напрямках джерел завад. Метою дослідження було оцінити, чи може компактний семиелементний масив забезпечити ефективність придушення понад 30 дБ при одночасному збереженні стабільного прийому супутникових сигналів. Результати показали, що S-CRPA досягає 35–40 дБ придушення при одному джемері та 25–30 дБ при двох одночасних, причому зберігається стійкість трекінгу сигналів. При цьому фазова похибка між елементами не перевищувала 5°, що свідчить про достатню стабільність для використання у високодинамічних сценаріях. Порівняно з класичними авіаційними 7-елементними антенами, нова конструкція мала удвічі менший діаметр і масу, але подібний рівень ефективності. Зазначено, що основними викликами для подальшого вдосконалення є точне калібрування фазових зсувів, температурна компенсація та зниження взаємного впливу елементів у компактному корпусі.

Для подолання систем РЕБ у зразках високоточних засобів повітряного нападу знайшла широке застосування антена з контрольованою спрямованістю прийому сигналу (CRPA), це активна приймальна антена, яка розроблена для захисту від радіоелектронного подавлення, навігаційного сигналу. Антена реалізована у вигляді цифрової антенної решітки, яка має декілька приймаючих елементів. Методом цифрової обробки сигналів антена спроможна відфільтрувати до N-1 навмисних сигналів перешкоди [12, 13]. CRPA знайшла широке застосування в навігації високоточних засобів повітряного нападу, баражуючих боєприпасів (ББ) типу «Shahed» («Герань-2»), авіабомб з уніфікованим модулем плане-

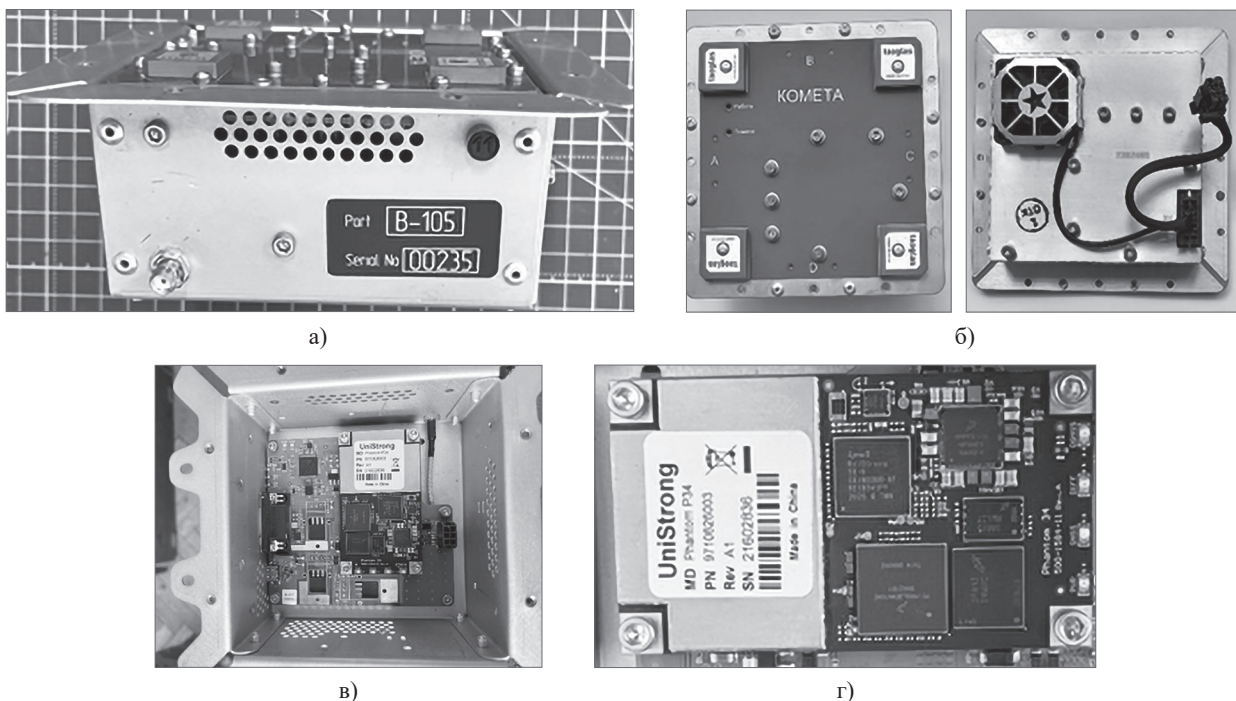


Рис. 1. Приймачі сигналів навігаційних систем, які застосовуються у ББ типу «Shahed» («Герань-2»): а) навігаційний блок В-105; б) малогабаритна адаптивна 4-х елементна антена решітка «КОМЕТА-М»; в) плата комутації; г) навігаційний приймач UniStrong

рування та корекції (УМПК), щоб протистояти радіо-перешкодам та спуфінгу.

На рис. 1 відображені приймачі сигналів навігаційних систем, які застосовуються у ББ типу «Shahed» («Герань-2»).

Дослідження антени від ракети X-32 з ПС СРНС СН-99 (рис. 2) визначило, що антена краще працює по сигналам супутників GPS та по окремим сигналам СРНС ГЛОНАСС.

Дослідження параметричних особливостей 4-елементної малогабаритної адаптивної антенної решітки

«Комета-М» за допомогою програми ANSYS (рис. 3, 4) показало її високу стійкість до радіоелектронного впливу, а її діаграма спрямованості є оптимальною для роботи з супутниками в умовах впливу РЕБ.

Відповідно до технічних умов на «Комета-М» коефіцієнт підвищення стійкості до перешкод приймальної апаратури супутникової навігації споживача за рахунок застосування перешкодозахищеної антенної системи складає не менше 40 дБ. У першу чергу, а згодом і паралельно із застосуванням рішення на базі «Комета-М» було застосоване на «Shahed-136» рішення з 4-елемент-

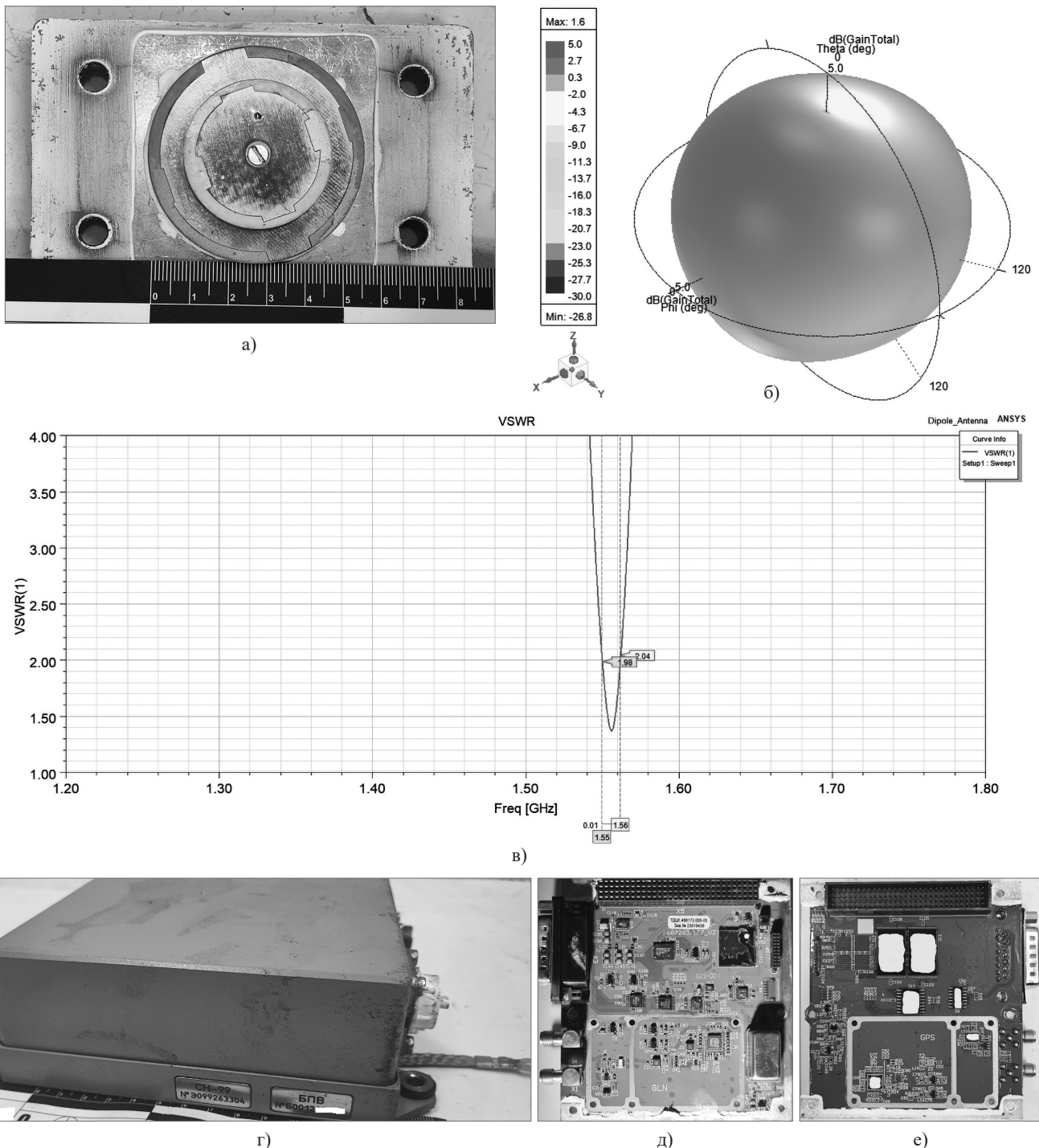
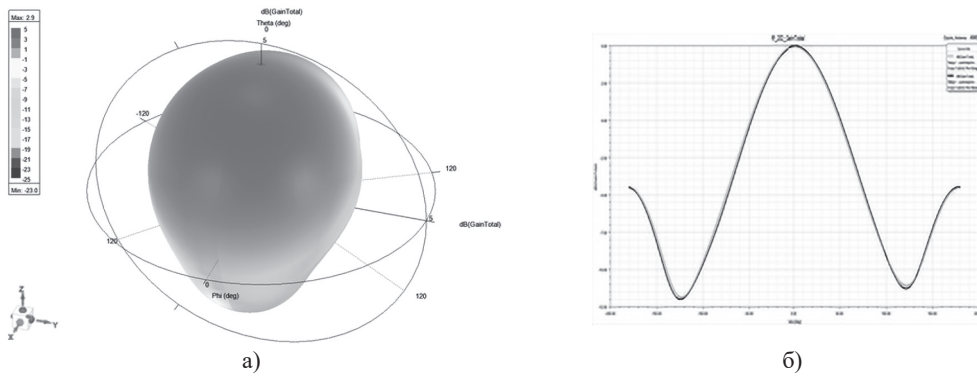
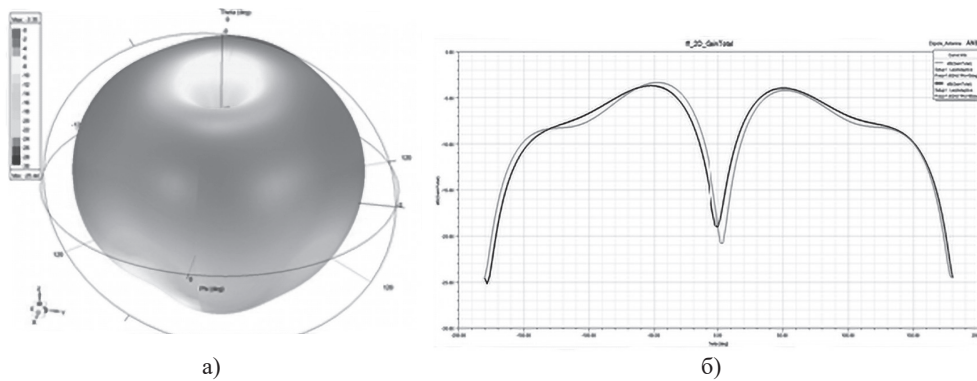


Рис. 2. Досліджена антена з ПС СРНС СН-99 ракети X-32: а) зовнішній вигляд антени; б) 3D – діаграма направленості антени; в) коефіцієнт стоячої хвилі за напругою антени; г) зовнішній вигляд ПС СРНС СН-99; д) топологія плати GLN; е) топологія плати GPS



Р и с . 3. Діаграма спрямованості 4-елементної антенної решітки без перешкод: а) 3D-модель; б) 2D-модель



Р и с . 4. Діаграма спрямованості 4-елементної антени при дії перешкоди (формування нуля діаграми спрямованості у напрямку перешкоди): а) 3D-модель; б) 2D-модель

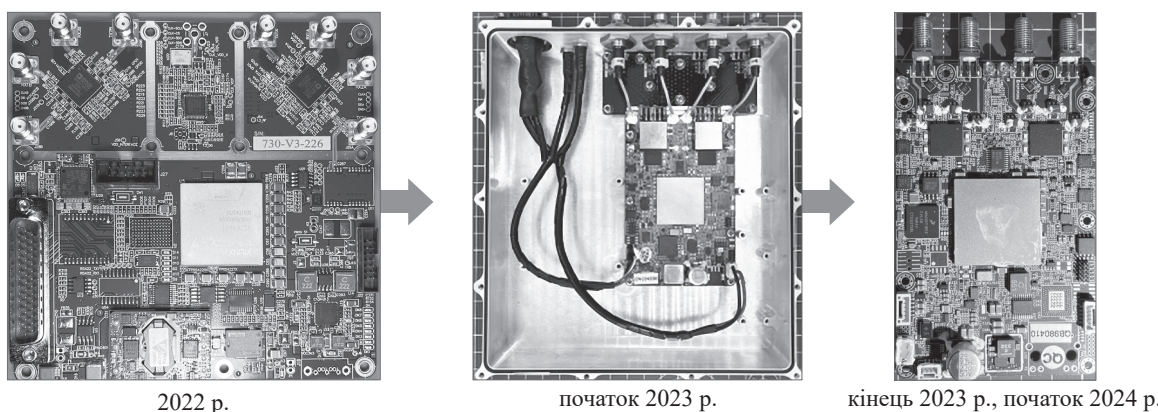
ною CRPA іншої реалізації. Аналіз динаміки структурних змін її блоку перешкодозахисту наведено на рис. 5, при цьому зафіксовані зміни:

– у 2022 р. конструктивна плата займала практично весь блок. Ключові елементи на платі – це FPGA «Xilinx» серії «Kintex-7» для реалізації просторової фільтрації та високопродуктивні трансивери від Analog Devices AD9361;

– у 2023 р. даний блок набув суттєвих змін, він реалізований на значно меншій платі, у перехідному варіанті із платою додаткових фільтрів (початок 2023 р.) та у одноплатному, компактному виконанні (кінець 2023 – початок 2024 р.). Маркування на ключових елементах у новіших версіях відсутнє, але за візуальними ознаками продовжують застосовуватись FPGA «Xilinx» або їх копії.

Вимірювання параметрів перешкодозахисту свідчать, що підвищилась не тільки технологічність, а й рівень перешкодозахисту даного блоку. Параметричний аналіз антен показав, що версії антен як 2022 р., так і 2023 р. призначені для тих самих частот та мають схожі характеристики, що підтверджено вимірюваннями та моделюванням.

Структурний аналіз компонентів антенних решіток типу «Комета» версій «Комета-М», «Комета-М8», «Комета-М12» показав, що вони подібні за конструкцією та мають практично однакову елементну базу, проте суттєво відрізняються кількістю антенних елементів та кількістю синхронізованих приймальних каналів: 4, 8 та 12 відповідно. Конструкція більше 4 каналів вимагає використання більшої кількості чипів для обробки аналогового сигналу, при цьому зберігаючи синхронність між каналами.



Р и с . 5. Динаміка структурних змін блоку перешкодозахисту навігаційної системи БПЛА «Shahed 136» серія «БІ»

«Комета» складається із ПС СРНС, системи адаптивної фільтрації, на базі потужної FPGA (програмованої логічної матриці) Altera Cyclone V, яка має у своєму складі двухядерний процесор Cortex-A9 та широкі можливості по обробці сигналу. Ключовими елементами решітки «Комета» є:

- 1) ПЛІС ALTERA Cyclone V виробництва США (Intel) та пам'ять EPCQ виробництва США (Intel) для високошвидкісної обробки цифрових даних;
- 2) 14-розрядний аналого-цифровий перетворювач LTC2174 виробництва США (Linear Technology Corporation з 2017 року – частина компанії Analog Devices);
- 3) 14-розрядний високошвидкісний ЦАП AD 9755 виробництва США (Analog Devices);
- 4) GNSS приймач для кінцевого приймання сигналів та визначення місця положення на базі модуля U-blox.

За результатом порівняння основних компонентів решітки «Комета» (табл. 1) можна відмітити, що з появою нових версій збільшується кількість приймальних елементів (каналів) – це тягне за собою необхідність використання більшої кількості 4-канальних АЦП та ПЛІС із більшою кількістю логічних елементів. Інтегрований ПС СРНС на відміну від версії застосування в 2022 році U-blox MAX-M10S набув тенденції постійного застосування у 2023–2025 рр.

Подальший розвиток захисту ПС СРНС від перешкод полягав у збільшенні кількості каналів антенних решіток (рис. 6, 7), удосконалення алгоритмів перешкодозахисту, використання високопродуктивних модулів приймачів (рис. 8).

В цілому ПС СРНС ударного БПЛА типу «Shahed-136» пройшла еволюційні зміни, які можна умовно поділити на такі етапи:

- 1) 2022 рік – навігаційна система у складі: інерціального модуля із двома приймачами Ublox-M8 (Швейцарія), навігаційного приймача Hemisphere H220 (США), з використанням іранської 4-канальної CRPA, яка має антенні елементи компанії «Taoglas» (Ірландія);
- 2) кінець 2023 року – 2024 рік – поява удосконаленої 4-канальної CRPA на Shaded-136, яка застосовувалась із GNSS приймачами Ublox M9;

Таблиця 1. Зміни компонентів «Комета»

	Призначення компонента	2022 рік	2023 рік	2024 рік	2025 рік
		«Комета-М»	«Комета-М»	«Комета-М8»	«Комета-М12»
1	ПЛІС	ALTERA Cyclone V	ALTERA Cyclone V	ALTERA Cyclone V	ALTERA Cyclone V
		5CEFA7F2317N	5CEFA7F2317N	5CEFA9F2317N	Невизначено
2	Пам'ять для ПЛІС	EPCQ64A	EPCQ128	EPCQ128	Невизначено
3	14-розрядний ЦАП	TxDAC AD9755	TxDAC AD9755	TxDAC AD9755	Невизначено
4	14-розрядний АЦП	4-канальний АЦП LTC2174	4-канальний АЦП LTC2174	2 шт. 4-канальних АЦП AD9253	3 шт. 4-канальних АЦП AD9253
5	Вбудований навігаційний приймач	GNSS приймач IPO-04 від АО «НИИМА "Прогрес"»	GNSS модуль MAX-M10S на базі U-blox M10050-KB (Швейцарія)	GNSS модуль MAX-M10S на базі U-blox M10050-KB (Швейцарія)	GNSS модуль MAX-M10S на базі U-blox M10050-KB (Швейцарія)
		Модуль приймача NV08C-CSM від КБ «Навис»			
		GNSS приймач U-blox M8			

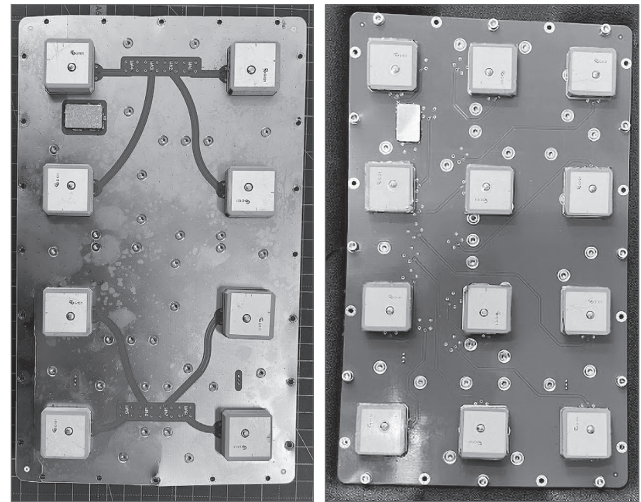


Рис. 6. Решітки «Комета-М8» та «Комета-М12»

3) кінець 2023 року – 2024 рік – поява «Герань-2» (російська версія «Shahed-136») з ПС СРНС у складі: інерціальний модуль, малогабаритна антенна решітка Комета-М (4-канальна), мультидіапазонний (L1, L2, L5) ПС СРНС Unistrong P20 (P327) (Китай);

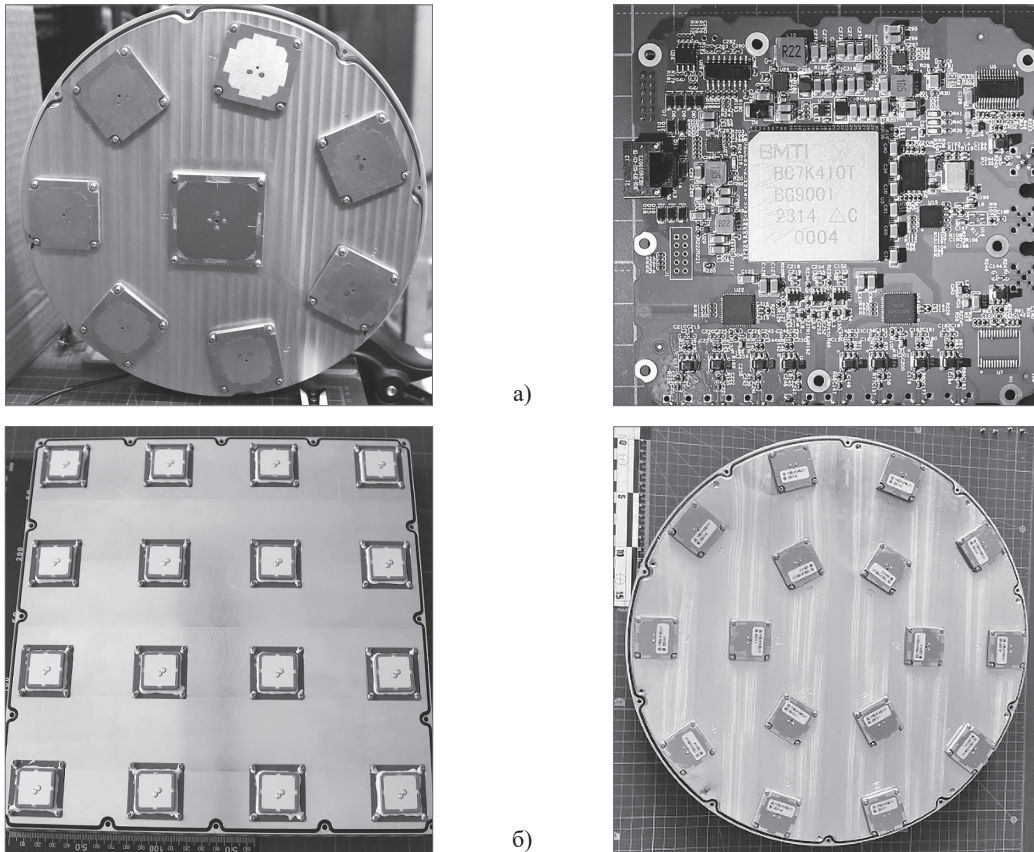
4) кінець 2024 року – початок 2025 року – використання на Shahed-136 виробництва «Алабуга» круглої 8-канальної CRPA (Китай), у якій виявлені китайські копії компонентів США, наприклад, FPGA Xilinx виробництва ВМТІ;

5) 2025 рік – застосування різних варіантів CRPA: наряду із 8-канальними круглими CRPA та 4-канальними іранського походження, застосовувались: кругла 16-канальна CRPA (Китай), квадратна 16-канальна (Китай) з елементами антенної решітки власного виготовлення, «Комета-М8» та «Комета-М12» (8-ми та 12-елементна антенні решітки відповідно), застосування приймачів Unicore UM982 (Китай).

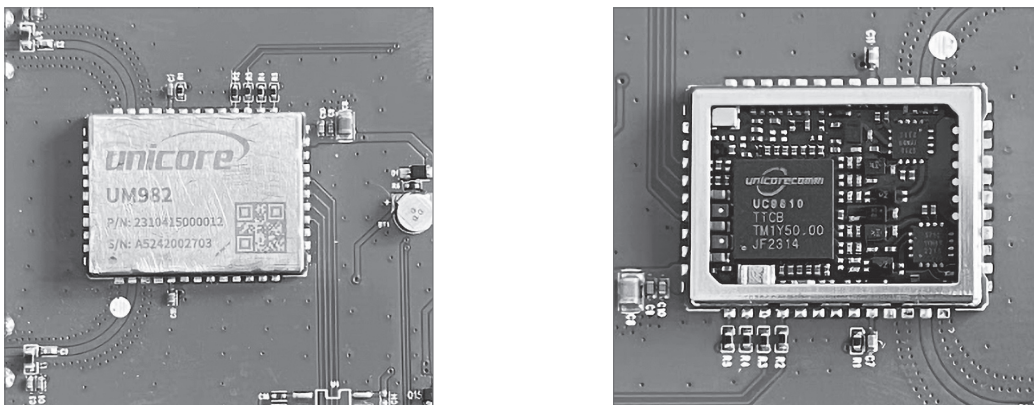
ВИСНОВОК

Таким чином, для вирішення завдань перешкодозахисту ПС СРНС використано наступні рішення:

- мультидіапазонність (з приймачем Unistrong);



Р и с . 7. CRPA китайського виробництва: а) 8-елементна CRPA;
б) 16-елементна CRPA (круглої та квадратної форми)



Р и с . 8. Модуль UNICORE UM982 (Китай)

- використання нових версій антенних решіток «Ко-мета»;
- поява нових рішень на базі китайських CRPA з 8, 16 каналами.

Основними трендами розвитку CRPA-систем є:

- зменшення габаритів при збереженні ефективності;
 - удосконалення формування діаграми спрямованості;
 - інтеграція обчислювальних модулів у корпус антени;
 - зростання ролі алгоритмічного забезпечення (формування променів, калібрування);
 - збільшення антенних масивів [6];
 - підвищення співвідношення J/S, зниження ймовірності втрати фіксації GNSS, стабільність трекінгу при наявності складного спектру перешкод [7].
- Сучасні тенденції полягають у наступному:

- поєднання апаратного захисту (CRPA) з алгоритмічними засобами – адаптивними фільтрами, машинним навчанням для виявлення аномалій (GPS World [10]);
 - використання гібридних архітектур GNSS/INS, які забезпечують навігацію навіть за повної втрати GNSS-сигналів;
 - автоматизація калібрування масивів антен та використання цифрових процесорів формування променів у компактних корпусах, що дасть змогу створювати перешкодозахищені ПС СРНС для малогабаритних платформ (Safran [5] і Spirent [2]).
- Таким чином, ПС СРНС з CRPA перетворюються з окремого вузла на елемент повністю цифрового ПС СРНС, здатного пристосовуватись до змінного радіочастотного середовища.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Konovaltsev, Andriy. Development of Array Receivers with Anti-Jamming and Anti-Spoofing Capabilities with Help of Multi-Antenna GNSS Signal Simulators. Germany. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/337669170> (дата звернення: 25.10.2025).
2. Конструктивні та функціональні особливості малогабаритної антенної решітки «Комета-М» / Шелемін З.К., Слюсар В.І., Сащук С.І., Голенковська Т.І. Озброєння та військова техніка. 2025. № 1(45). С. 45—55. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1\(45\).45-55](https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1(45).45-55).
3. Карлов Д.В., Коробецький О.В., Резніков Ю.В. Рекомендації щодо розробки захищеного від завад приймача глобальних навігаційних супутникових систем для вирішення завдань збройних сил України. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 4(64). С. 60—66.
4. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Забезпечення заводозахисності приймачів сигналів GNSS шляхом використання алгоритмів просторової фільтрації. Озброєння та військова техніка. 2019. № 3(23). С. 62—67. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.3\(23\).62-67](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.3(23).62-67).
5. Inside GNSS. CRPA for GNSS: Benefits, Challenges and Testing. Inside GNSS Magazine. 2023. Vol. 19. No. 3. Available at: <https://insidengss.com>; <https://insidengss.com/crpa-for-gnss-benefits-challenges-and-testing/> (дата звернення: 22.10.2025).
6. Spirent Communications. CRPA Antennas Explained: Understanding Controlled Reception Pattern Antennas. Spirent White Paper. 2023. Available at: <https://www.spirent.com> (дата звернення: 18.10.2025).
7. Fante, R. L. (2002). Effect of Adaptive Array Processing on GPS Signals. The MITRE Corporation Technical Report MTR 02W0000211. Bedford, MA, USA.
8. Safran Electronics & Defense. An Engineer's Guide to CRPA Testing. Safran Technical White Paper. 2022. Available at: <https://www.safran-electronics-defense.com> (дата звернення: 02.10.2025).
9. Schirmer, C., Ziebold, R. & Konovaltsev, A. (2018). Evaluation of Array Antenna Systems for Global Navigation Satellite System Receivers. IET Radar, Sonar & Navigation. Vol. 12. No. 2. Pp. 201—210. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0310>.
10. Sun, L., Wang, H., Zhang, Y. & Chen, J. (2022). Anti-Jamming Method for Array Antenna Receivers Based on Adaptive Beamforming. Remote Sensing (MDPI). Vol. 14. No. 3. Article 562. <https://doi.org/10.3390/rs14030562>.
11. NAVSYS Corporation. Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna. ION GNSS Proc. 2014. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1488.0968>.
12. Anti-jam technology: Demystifying the CRPA – GPS World. GPS World – The Business and Technology of Global Navigation and Positioning. 12 квітня 2017. <https://www.gpsworld.com/anti-jam-technology-demystifying-the-crpa/> (дата звернення: 20.10.2025).
13. What are CPRA or Controlled Reception Pattern Antennas? <https://www.everythingrf.com/community/what-are-controlled-reception-pattern-antennas> (дата звернення: 15.10.2025).

REFERENCES

1. Konovaltsev, Andriy. Development of Array Receivers with Anti-Jamming and Anti-Spoofing Capabilities with Help of Multi-Antenna GNSS Signal Simulators. Germany. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/337669170>.
2. Shelemin, Z.K., Slyusar, V.I., Sashchuk, S.I. & Holenkovska, T.I. (2025). “Konstruktyvni ta funktsionalni osoblyvosti malohabarytnoi antennoi reshitky «Kometa-M»” [Structural and Functional Features of the Compact Antenna Array «Kometa-M»]. Weapons and Military Equipment. No. 1(45). Pp. 45—55. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1\(45\).45-55](https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.1(45).45-55).
3. Karlov, D.V., Korobetskyi, O.V. & Rieznikov, Yu.V. (2020). “Rekomendatsii shchodo rozrobky zakhyshchenoho vid zavad priimacha hlobalnykh navihatsiinykh suputnykovykh system dlia vyrishennia zavdan Zbroinykh Syl Ukrainy” [Recommendations for Developing an Interference-Resistant GNSS Receiver for the Armed Forces of Ukraine]. Weapons Systems and Military Equipment. No. 4(64). Pp. 60—66.
4. Zibin, S.D., Popov, A.O. & Tverdokhlibov, V.V. (2019). “Zabezpechennia zavadozakhyshchenosti priimachiv signaliv GNSS shliakhom vykorystannia alhorytmiv prostorovoi filtratsii” [Ensuring GNSS Receiver Interference Protection by Using Spatial Filtering Algorithms]. Weapons and Military Equipment. No. 3(23). Pp. 62—67.
5. Inside GNSS. CRPA for GNSS: Benefits, Challenges and Testing. Inside GNSS Magazine. 2023. Vol. 19. No. 3. Available at: <https://insidengss.com>; <https://insidengss.com/crpa-for-gnss-benefits-challenges-and-testing/> (accessed: 22.10.2025).
6. Spirent Communications. CRPA Antennas Explained: Understanding Controlled Reception Pattern Antennas. Spirent White Paper. 2023. Available at: <https://www.spirent.com> (accessed: 18.10.2025).
7. Fante, R. L. (2002). Effect of Adaptive Array Processing on GPS Signals. The MITRE Corporation Technical Report MTR 02W0000211. Bedford, MA, USA.
8. Safran Electronics & Defense. An Engineer's Guide to CRPA Testing. Safran Technical White Paper. 2022. Available at: <https://www.safran-electronics-defense.com> (accessed: 02.10.2025).
9. Schirmer, C., Ziebold, R. & Konovaltsev, A. (2018). Evaluation of Array Antenna Systems for Global Navigation Satellite System Receivers. IET Radar, Sonar & Navigation. Vol. 12. No. 2. Pp. 201—210. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0310>.
10. Sun, L., Wang, H., Zhang, Y. & Chen, J. (2022). Anti-Jamming Method for Array Antenna Receivers Based on Adaptive Beamforming. Remote Sensing (MDPI). Vol. 14. No. 3. Article 562. <https://doi.org/10.3390/rs14030562>.
11. NAVSYS Corporation. Test Results of a 7-Element Small Controlled Reception Pattern Antenna. ION GNSS Proc. 2014. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1488.0968>.
12. Anti-jam technology: Demystifying the CRPA – GPS World. GPS World – The Business and Technology of Global Navigation and Positioning. April, 12. 2017. <https://www.gpsworld.com/anti-jam-technology-demystifying-the-crpa/>

www.gpsworld.com/anti-jam-technology-demystifying-the-crpa/ (accessed: 20.10.2025).

13. What are CPRA or Controlled Reception Pattern Antennas? <https://www.everythingrf.com/community/what-are-controlled-reception-pattern-antennas> (accessed: 15.10.2025).

Saschuk S.I., Slyusar V.I., Shelemin Z.K., Drogovoz K.V.

EVOLUTIONARY TRENDS IN SATELLITE RADIO NAVIGATION SIGNAL RECEIVERS FOR HIGH-PRECISION AIRBORNE WEAPON SYSTEMS

The article presents the results of research conducted on-board navigation systems of unmanned aerial vehicles and missiles used by the Russian Federation against Ukraine, using the example of «Shahed-136» (Geran-2), X-32. The changes that have occurred in the structure of antenna systems and signal receivers of satellite navigation systems are analyzed.

The trends in the further development of interference-protected navigation receivers with small-sized adaptive antenna arrays are studied. 3D models of antennas created using ANSYS software are presented. The work includes a parametric and structural analysis of navigation receivers, with special attention paid to antennas with a controlled radiation pattern. The article draws attention to the further development of protection of navigation receivers from interference, which consist in increasing the number of antenna array channels, as well as in improving interference protection algorithms.

The conclusions draw attention to the interference protection of receivers, which consist of multi-band and integration with inertial modules. Trends in the development of antennas with a controlled directional pattern are identified, which are aimed at reducing dimensions while maintaining efficiency, improving the formation of the directional pattern, integrating computing modules into the antenna body, increasing the role of algorithmic support (beamforming, calibration), increasing antenna arrays, increasing the signal-to-noise ratio, reducing the probability of GNSS fixation loss, tracking stability in the presence of a complex spectrum of interference.

Keywords: navigation system, airborne systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), spoofing, electronic warfare, antenna with a controlled directional pattern.

Відомості про авторів:

Сащук Святослав Іванович

начальник науково-дослідної лабораторії розвитку засобів навігаційного та топогеодезичного забезпечення науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7246-9110>
svyatoslavsaschuk@gmail.com

Слюсар Вадим Іванович

доктор технічних наук, професор
начальник групи головних наукових співробітників
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
e-mail: swadim@ukr.net

Шелемін Захар Костянтинів

молодший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії розвитку засобів навігаційного та топогеодезичного забезпечення науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-7740-2245>
e-mail: zarshel@gmail.com

Дроговоз Костянтин Віталійович

науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку засобів радіоелектронної боротьби науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-8785-9805>
kostya19712109@gmail.com

Information about the authors:

Saschuk Svyatoslav

Head of the Research Laboratory for the Development of Navigation and Topogeodetic Support Tools of the Research Department for the Development of Weapons and Military Equipment of the Support Forces Scientific Research Department for the Development of Armament and Military Equipment of the Special Forces Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7246-9110>
svyatoslavsaschuk@gmail.com

Slyusar Vadym

Doctor of Technical Sciences
Professor, Group of Chief Research Scientists for Scientific Research Management
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
email: swadim@ukr.net

Shelemin Zakhar

Junior Research Fellow at the Research Laboratory for the Development of Navigation and Topogeodetic Support Tools of the Research Department for the Development of Weapons and Military Equipment of the Support Forces Scientific Research Department for the Development of Armament and Military Equipment of the Special Forces Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-7740-2245>
e-mail: zarshel@gmail.com

Drogovoz Kostyantyn

Research Fellow of the Research Department for the Development of Electronic Warfare Equipment of the Research Administration for the Development of Armaments and Military Equipment of the Special Troops Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-8785-9805>
kostya19712109@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 04.11.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 678.664:678.066

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).96-104](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).96-104)

Ю. В. САВЕЛЬЄВ, доктор хімічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0003-3356-9087>

Л. А. МАРКОВСЬКА, кандидат хімічних наук
<https://orcid.org/0000-0003-9427-9786>

О. М. ГОНЧАР, кандидат хімічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-8356-9283>
(Інститут хімії високомолекулярних сполук
НАН України, м. Київ)

К. А. ОЛІЙНИК
<https://orcid.org/0000-0001-8007-6686>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

Є. О. ШУЛЬЖЕНКО
(Командування логістики ВМС ЗС України, м. Одеса)

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО ЗАХИСТУ КОНСТРУКЦІЙ ВІЙСЬКОВИХ КОРАБЛІВ

Захист особового складу на військових об'єктах від падіння і травмування, а металевих конструкцій цих об'єктів від корозії може бути запроваджений шляхом створення нековзних антикорозійних покриттів і розглядатися як комплексний. Інститутом хімії високомолекулярних сполук НАН України, при науково-технічному супроводженні робіт Центральним науково-дослідним інститутом озброєння та військової техніки Збройних Сил України, створено композиційне нековзне антикорозійне поліуретанове забарвлене покриття (НАПЗП) органо-органічного типу на основі суміші сітчастого/лінійного поліуретанів (СПУ/ЛПУ70/30) з різним вмістом органо-органічного наповнювача з пігментом (RAL7040). Властивості створених НАПЗП: стійкість до (а)біотичних і техногенних деструктуючих факторів, коефіцієнт тертя (μ) за різних умов (середовищ) і різного навантаження становить 0,60–0,83, демпфуючі властивості ($\tan\delta$) за температурних режимів $-10^\circ\text{C}/+25^\circ\text{C}/+50^\circ\text{C}$ дорівнюють відповідно 0,082/0,119/0,175 і коефіцієнт зносо-стійкості (G) за надвисоких навантажень $<0,02\%$ після дії природних (модельних) деструктуючих чинників відповідають заданим для покриттів, що експлуатуються за екстремальних умов. НАПЗП, як «зони безпеки», створені на верхній палубі катера проєкту 58155 (в/ч А0456). Проведення моніторингу, створеного НАПЗП при його експлуатації на верхній палубі катера протягом чотирнадцяти місяців (продовженого ще на один рік), підтвердило надійність антикорозійного захисту палуби корабля та безпечне обслуговування його екіпажем. Створене НАПЗП гарантує надійний за-

хист екіпажу від ковзання, що дозволяє йому виконувати завдання, уникаючи травматизму при знаходженні на палубі, а предметам не ковзати під час хитавиці. Водночас металевим поверхням забезпечений захист від агресивних техногенних і природних деструктуючих чинників, що покращує їх експлуатаційні властивості.

Ключові слова: військові об'єкти, екіпаж, нековзні покриття, пролонгований антикорозійний захист, надійна експлуатація, експлуатаційні властивості.

ВСТУП

Система гарантованого пролонгованого комплексного захисту військових об'єктів Військово-Морських Сил Збройних Сил України та безпечного обслуговування їх особовим складом, яка дозволяла б морякам виконувати свої завдання, уникаючи травматизму на корабельній палубі, зокрема та поліпшити експлуатаційні характеристики конструкцій корпусу корабля за умов експлуатації може бути запроваджена шляхом створення покриттів, з нековзними та антикорозійними властивостями водночас.

Дослідженням зі створення нековзних покриттів (anti-slip coatings) приділяється постійна увага. Вони створюються та проходять випробування у дослідницьких лабораторіях ВМС (NRL) закордонних країн, зокрема в Управлінні морських систем ВМС (NAVSEA). Управлінням військово-морських досліджень (ONR) створено Програму майбутніх військово-морських можливостей (Dr. Airan Perez), що підтримується Командуванням морських систем ВМС США. Вчені хімічного відділу Військово-морської дослідницької лабораторії (Chemistry Division at the Naval Research Laboratory) розробили нове двокомпонентне нековзне покриття на основі силосану для використання на польотних палубах та доріжках кораблів ВМС США. Нове покриття є більш міцним, стійким до впливу хімікатів, хімічно стійким та дешевшим завдяки довшому терміну служби, ніж традиційні покриття на основі епоксидної смоли. Повідомляється про покриття, де полімерною матрицею є епоксидна смола, поліуретан або суміші епоксидна смола/поліуретан та наночастинки, такі як оксид алюмінію, кремнезем, оксид титану, оксид цинку, глина та матеріали на основі вуглецю [1]. Питанню формування взаємопроникаючих полімерних сіток на основі поліуретан/епоксидної смоли присвячено огляд [2]. Показано, що використання двох полімерів привело до покращення механічних, термічних, демпфуючих властивостей. В статті [3] розглядаються швидкотвердіючі протиковзні покриття, що містять наповнювачі, які допомагають створити стійку до ковзання поверхню в місцях знаходження людей. На USS «Carl Vinson» нековзні покриття використовувалися, зокрема, на польотній палубі. Нековзні покриття можна також використовувати в приміщеннях, які мають більш складну конструкцію, наприклад, VLS (Vertical Launch System).

З іншого боку, надзвичайно актуальною і економічно важливою, з точки зору величезних матеріальних втрат, є проблема антикорозійного комплексного захисту військових об'єктів від руйнування внаслідок дії природних і техногенних деструктуючих чинників [4–6].

Метою статті є подальший розвиток та вдосконалення технологій комплексного захисту військових об'єктів для забезпечення безпеки особового складу під час виконання завдань та підвищення експлуатаційної надійності цих об'єктів за звичайних і специфічних умов. Це досягається шляхом створення технологічно та економічно доцільних нековзних антикорозійних композиційних полімерних покриттів із забарвленим фінішним шаром органо-органічного типу для захисту поверхонь, зокрема: палуб кораблів (корабельна сталь 10ХСНД), які матимуть як нековзні, так і захисні властивості проти руйнування під впливом різних деструкуючих чинників, високі показники адгезії та експлуатаційних властивостей.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На нашу думку, захист металевих конструкцій військових кораблів, їх безпечне обслуговування особовим складом та підвищення експлуатаційних властивостей за звичайних і специфічних умов може бути запроваджений шляхом створення нековзних антикорозійних покриттів з використанням технологічно та економічно доцільних поліуретанів різної структури (лінійної/зшитой) і різного складу (ароматичний/аліфатичний діізоціанати, поліетер синтетичний/відновлювана сировина – рослинна олія) із застосуванням наповнювачів – органічних речовин (гумова крихта, отримана методом рециклінгу) різних фракцій та вмісту, що дасть змогу створити нековзні покриття із забезпеченням високих антикорозійних властивостей, стійких до дії (а) біотичних і техногенних динамічних деструкуючих чинників (зокрема, морської води та соляного туману, нафто-хімічних агентів, тертя).

Надійну експлуатацію об'єктів і пролонговане збереження конструкцій об'єктів, які експлуатуються у водних, лужних, слабо кислих і сольових середовищах, а також за умов динамічних природних і техногенних навантажень гарантує використання антикорозійних захисних поліуретанових покриттів, що мають нековзні властивості [7–9]. Різноманітність структури (лінійна, розгалужена, лінійна/розгалужена) макромолекули поліуретанів, що є результатом взаємодії ізоціанатів і синтетичних поліетерів і гідроксилвмісних природних речовин, забезпечує стійкість поліуретанів до дії деструкторів. Стійкість до вібродинамічних і ударних навантажень в температурному діапазоні від $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ обумовлюється еластичністю цих матеріалів. Світлостійкості покриттів сприятиме використання аліфатичних діізоціанатів, не утворюючих під дією світла хіноїдних структур та пігменту RAL 7040, який надає світлостійкості покриттю. Поверхні, покриті антикорозійним захисним поліуретановим покриттям (АПП), стають довговічними тому, що використані захисні поліуретанові покриття є водо-, зносо-, світло-, бензо-, біостійкими, стійкими до дії хімічних середовищ та до тертя й динамічних навантажень.

Об'єкти досліджень

АПП синтезовано на основі сітчастого поліуретану (СПУ) – продукту взаємодії толуїлендіізоціанату (ТДІ) і триметилпропану та лінійного поліуретану (ЛПУ) на основі аліфатичного гексаметилендіізоціанату (ГМДІ)

та лапролу Л-1000, в результаті чого отримують антикорозійне полімерне покриття складу СПУ/ЛПУ70/30. В отриманий АПП додають пігмент RAL-7040 (5–10 % ваг.) та органічний наповнювач (ОН) – гумову крихту, з постійним переміщуванням, і таким чином, отримують нековзне антикорозійне полімерне забарвлене покриття, НАПЗП [10].

Фізико-механічні властивості АПП, а саме адгезійні властивості, когезійну міцність (σ) за межею міцності при розтягу, відносне видовження (ϵ) визначали згідно зі штатною нормативною документацією. Відтворення значень показників перевіряли за результатами понад 5 паралельних випробувань. **Життєздатність АПП** визначали візуально методом спостереження кожної доби до желеутворення. **Термостійкість** зразків плівок АПП визначали методом термогравіметрії (Derivatograf Q-1000, MOM Hungary). За температуру початку деструкції вважали температуру втрати 5 мас. % ваги. **В'язкопружні властивості АПП** досліджено методом динамічного механічного аналізу (ДМА), з використанням DMA 800 Analyzer (TA Instruments, USA). Для досліджених зразків отримано температурні залежності модуля пружності (E'), модуля механічних втрат (E''), тангенса механічних втрат ($\tan \delta$). **Стійкість АПП** до дії хімічних середовищ визначали згідно зі штатною нормативною документацією. **Стійкість КНАПЗП** на стиранність із різним вмістом ОН проведено згідно з [11].

Дослідження фізико-механічних властивостей показали, що вихідні АПП (СПУ/ЛПУ70/30) мають високі показники когезії, які становлять без пігменту та із вмістом 5 % пігменту RAL-7040 40,0 і 40,3 МПа, відповідно. НАПЗП на основі СПУ/ЛПУ70/30 характеризуються високою адгезією, адгезійна міцність їх менше одного балу (табл. 1).

Дослідження стійкості НАПЗП до дії природних та техногенних деструкторів: води (технічної та морської), хімічних середовищ (бензину, етилацетату, дизельного палива, 20 % водного розчину їдкою калію) показало високу ефективність полімерних покриттів (табл. 2).

Проведено дослідження в'язкопружних властивостей АПП та порівняльний аналіз їх показників за температур, наближених до температур використання матеріалу (табл. 3).

Показано, що значення E' зразків визначаються структурою матеріалу і залежать від температури, але всі синтезовані полімери характеризуються високими показниками модуля пружності. Порівняння в'язкопружних властивостей зразків СПУ/ЛПУ70/30 та СПУ/ЛПУ70/30 з додаванням пігменту показало, що додавання пігменту знижує T_g , на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ та приводить до зростання значень E'' та $\tan \delta$. Отже, матеріал, що містить пігмент, характеризується більш високою демпферною ефективністю.

Дослідження лабораторних зразків НАПЗП з визначення коефіцієнта тертя за різних умов і різного навантаження та зносостійкості показали високу стійкість цих покриттів до механічного тертя.

Сила зовнішнього тертя – сила опору, що виникає при зміщенні одного тіла по поверхні іншого і спрямована тангенціально до спільного кордону між двома

Таблиця 1. Значення фізико-механічних властивостей зразків НАПЗП

№ зразка	НАПЗП*	Наповнювач (ОН), г/м ²	Адгезійна міцність, бал	Термостійкість, °С
2	СПУ/ЛПУ _{70/30}	480	< 1,0	265
7	СПУ/ЛПУ _{70/30}	360	< 1,0	260
10	СПУ/ЛПУ _{70/30}	240	< 1,0	260

* +5% пігменту RAL7040

Таблиця 2. Стійкість НАПЗП до дії деструкторів протягом (термін до 90 діб)

НАПЗП*	Деструктори						
	1	5	10	20	30	60	90
Витримка у дистильованій воді**							
СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,00	-9,71	-1,39	0,11	0,11	0,11	0,11
Витримка у морській воді							
СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,00	-0,35	-1,08	0,34	0,34	0,34	0,34
Витримка у бензині							
СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,00	0,24	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27
Витримка у дизельному паливі							
СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,00	-1,04	-2,2	-2,61	-2,61	-2,61	-2,6
Витримка у етилацетаті							
СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,00	0,14	0,18	0,78	0,04	0,04	0,04
Витримка у 20% водному розчині їдкою калію							
СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,00	0,03	-0,16	-0,09	-0,08	-0,03	-0,03

* +5 % пігменту RAL7040

** приріст маси (+)/втрата маси(-)

Таблиця 3. Показники в'язкопружних властивостей синтезованих полімерів

АПП	Тс, °С	Е', МПа			Е'', МПа			tanδ		
		Температура, оС								
		-10	+25	+50	-10	+25	+50	-10	+25	+50
СПУ/ЛПУ _{70/30}	130	2730	1150	574	215	118	77	0,080	0,103	0,135
СПУ/ЛПУ _{70/30} + RAL7040	120	3018	1255	532	246	149	93	0,082	0,119	0,175

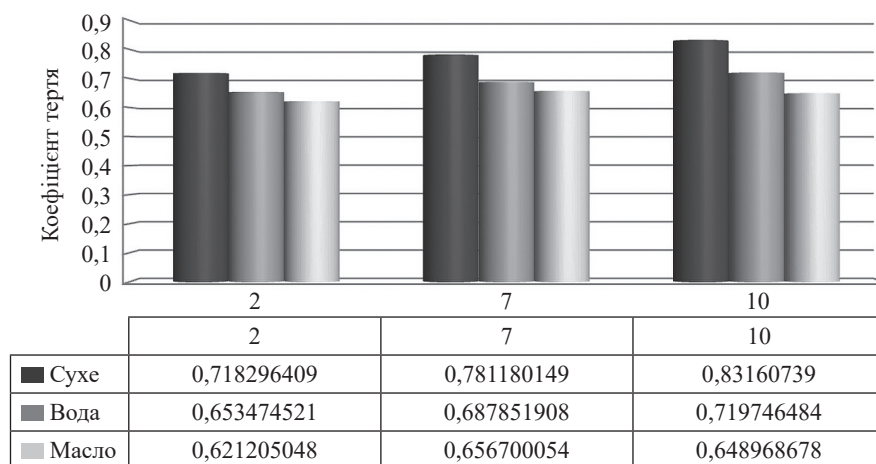
тілами. Відповідно до сучасних уявлень, тертя має двоїсту молекулярно-механічну природу. На площинах фактичного контакту поверхонь діють сили молекулярного тяжіння, що утворюють адгезійні зв'язки. При відносному зсуві тіл відбувається їх руйнування, що вимагає витрат енергії в незворотній формі. Механічна складова сили тертя залежить від глибини проникнення виступів одного тіла в інше і є складною функцією навантаження, геометричних і фізико-механічних характеристик поверхні. З огляду на різноманіття факторів, які впливають на величину сили тертя, коефіцієнт тертя визначається експериментально. У технічних розрахунках сила тертя обчислюється у вигляді частки нормальної складової реакції тиску поверхонь, що труться. Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість невідомих сил у динамічних рівняннях руху пар тертя. Тоді сила тертя $F = \mu N$, де N – нормальна складова реакції поверхонь, що труться, μ – коефіцієнт тертя. Для кожного зразка проводили по шість паралельних вимірювань із ступінчастим збільшенням нормального навантаження. При цьому величина нормального на-

вантаження становила 110, 210 і 510 грамів з урахуванням ваги гумового бруска. Коефіцієнт тертя показує, як саме сила тертя залежить від сили нормальної реакції (ваги тіла), яку частку від неї становить. Коефіцієнт тертя – безрозмірна величина і для різних пар тертя має різне значення, де $F_{ср}$ – середнє арифметичне значення сил тертя – визначається для всіх випробуваних груп зразків; N – навантаження, що притискає гумовий брусок до зразків, які досліджуються. Результати вимірювань коефіцієнту тертя в різних середовищах (сухому, мокрому і з мастилом) зразків № 2, 7, 10 наведені на рис. 1.

Нижче представлені значення коефіцієнта тертя μ (табл. 4).

Нижче наведено графіки залежності коефіцієнта тертя від навантаження (рис. 2–4).

З представлених залежностей видно, що зі збільшенням навантаження збільшується значення коефіцієнта тертя зразків з наповнювачем на поверхні. Збільшення значень коефіцієнта тертя обумовлено наявністю виступів на поверхні, які зі збільшенням навантаження

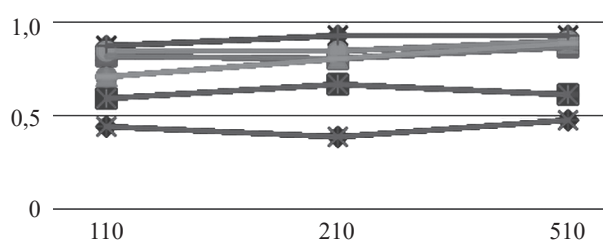


Р и с . 1. Усереднені значення коефіцієнту тертя досліджуваних зразків НАПЗП (№№ 2, 7, 10) у різних середовищах (сухому, вологому, з мастилом)

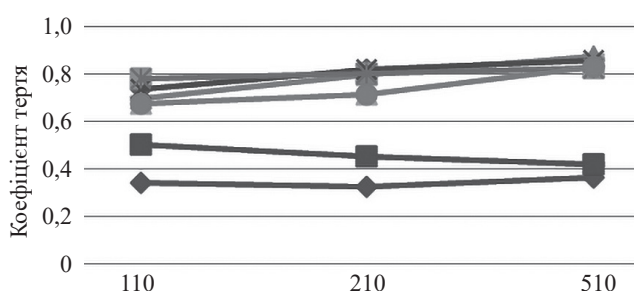
Т а б л и ц я 4. Значення коефіцієнта тертя зразків НАПЗП різних складів в різних середовищах (сухому, вологому, з мастилом)

N зразка	НАПЗП*	Фракції наповнювачів	Співвідношення фракцій наповнювачів крупна-дрібна	Наповнювач (ОН), г/м ²	Коефіцієнт тертя μ в різних середовищах		
					сухе	вологе	з мастилом
1	СПУ/ЛПУ _{70/30}	–	–	–	0,574	0,544	0,516
2	СПУ/ЛПУ _{70/30}	–	–	–	0,574	0,544	0,516
3	СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,8–1,0/0,4–0,5	50–50	480	0,718	0,654	0,621
4	СПУ/ ЛПУ _{70/30}	0,8–1,0/0,4–0,5	60–40	480	0,780	0,657	0,638
5	СПУ/ ЛПУ _{70/30}	0,8–1,0/0,4–0,5	70–30	480	0,740	0,641	0,626
6	СПУ/ЛПУ _{70/30}	1,0–1,2/0,4–0,5	30–70	480	0,770	0,660	0,630
7	СПУ/ЛПУ _{70/30}	2,0–2,5/0,4–0,5	70–30	240	0,730	0,670	0,64
8	СПУ/ ЛПУ _{70/30}	1,0–1,2/0,4–0,5	70–30	360	0,781	0,688	0,657
9	СПУ/ ЛПУ _{70/30}	2,0–2,5/0,4–0,5	70–30	360	0,76	0,671	0,642
10	СПУ/ЛПУ _{70/30}	1,0–1,2/0,4–0,5	30–70	360	0,832	0,720	0,649

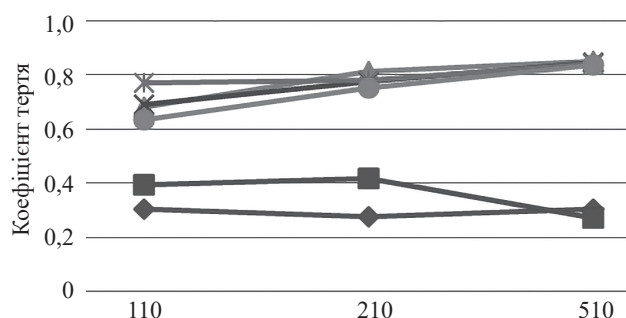
* +5 % пігменту RAL7040



Р и с . 2. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження (сухий метал)



Р и с . 3. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження (зволожений метал)



Р и с . 4. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження (змащений метал)

глибше проникають в гумовий брусок, що збільшує механічну складову сили тертя.

Проведені дослідження поліуретанових покриттів НАПЗП із різним вмістом ОН **на стираність**. Результати дослідження наведено в табл. 5.

Результати випробувань на стираність НАПЗП показують найвищу ефективність та надійність захисту створених покриттів – як вихідні НАПЗП стійкі до стираності (їх стираність дорівнює нулю), так і наявність ОН

Таблиця 5. Значення стиранності зразків НАПЗП типів різних складів

№ зразка	НАПЗП	Фракції наповнювачів	Співвідношення фракцій наповнювачів крупна-дрібна	Наповнювач, г/м ² ОН	Стиранність G, г/см ²
1	СПУ/ЛПУ _{70/30}	–	–	–	0,000
2	СПУ/ЛПУ _{70/30}	–	–	–	0,000
3	СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,8–1,0/0,4–0,5	50–50	480	0,000
4	СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,8–1,0/0,4–0,5	60–40		0,000
5	СПУ/ЛПУ _{70/30}	0,8–1,0/0,4–0,5	70–30		0,000
6	СПУ/ЛПУ _{70/30}	1,0–1,2/0,4–0,5	30–70		0,000
7	СПУ/ЛПУ _{70/30}	2,0–2,5/0,4–0,5	70–30	240	0,000
8	СПУ/ЛПУ _{70/30}	1,0–1,2/0,4–0,5	70–30	360	0,000
9	СПУ/ЛПУ _{70/30}	2,0–2,5/0,4–0,5	70–30		0,002
10	СПУ/ЛПУ _{70/30}	1,0–1,2/0,4–0,5	30–70		0,000
11	СПУ/ЛПУ _{70/30}	2,0–2,5/0,4–0,5	30–70	240	0,000

в складі НАПЗП не впливає на стійкість до стиранності покриттів і вона, із різним вмістом ОН, також дорівнює нулю (табл. 5).

Проведено випробування НАПЗП щодо дії **природних (модельних) деструкуючих чинників** (комплексного атмосферного фактору: УФ- та ІЧ-опромінення (сонячне світло), підвищена температура (50±5) °С і вологість повітря (96 %)). Випробування проводили в кліматичній камері протягом 360 годин, що еквівалентно терміну експлуатації в атмосферних умовах протягом 3 років. Слід відзначити, що когезійна міцність захисних покриттів із вмістом пігменту після витримки в кліматичній камері незначно збільшується (40,2 / 40,6 МПа, відповідно до і після).

Результати дослідження впливу комплексного атмосферного фактору на зразки НАПЗП представлені на рис. 5, 6.

Таким чином, результати дослідження впливу комплексного атмосферного фактору показують, що створене НАПЗП (органно-органічного типу) має стійкість до дії УФ- та ІЧ- опромінення, підвищених температури та вологості повітря.

Експериментальна перевірка надійності та ефективності НАПЗП

Випробування за натурних умов експериментального зразка покриття (сталь 10ХСНД, 100×50 см), протягом 6 місяців на артилерійському катері підтвердили його надійність, ефективність та стійкість до природних і техногенних чинників [12]. На базі отриманих результатів досліджень ефективності НАПЗП, проведених в лабораторних та натурних умовах, відпрацьована технологія створення нековзного антикорозійного поліуретанового забарвленого покриття для безпечного обслуговування військового корабля особовим складом та підвищення його експлуатаційної надійності за звичайних і специфічних умов. Створений лабораторний зразок АПП з використанням сировини, призначеної для створення НАПЗП органно-органічного типу заданої площі та проведено верифікацію його головних технологічних властивостей, яка підтвердила збереження заданих властивостей. Життєдіяльність полімерної композиції, до нанесення, перевищує 30 діб. Це є достатнім терміном для зберігання матеріалу, доставки його до об'єкта та створення НАПЗП. Адгезійна міцність за межами

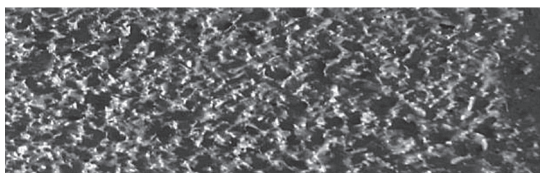
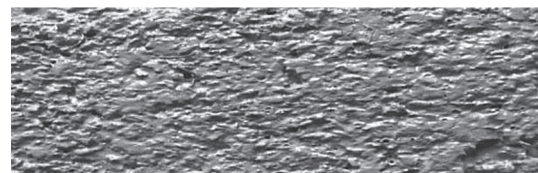
1 – СПУ/ЛПУ_{70/30}/5%RAL7040+70кр/30м2 – СПУ/ЛПУ_{70/30}/5%RAL7040+30кр/70м

Рис. 5. Фотографія зразків до випробувань

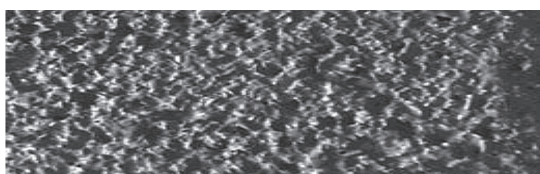
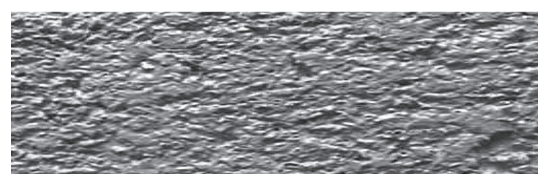
1 – СПУ/ЛПУ_{70/30}/5%RAL7040+70кр/30м2 – СПУ/ЛПУ_{70/30}/5%RAL7040+30кр/70м

Рис. 6. Фотографія зразків після випробувань

міцності при нормальному відриві (сталь–сталь): повне затвердіння 30 – 34 МПа; після витримки у воді протягом 30 діб 29 – 32 МПа. Зразки стійкі до дії агресивних середовищ: витримування в різних середовищах (вода технічна, вода морська, дизельне паливо, етилацетат, авіаційний бензин) протягом 90 діб підтвердили їхню стійкість. Випробування за натурних умов експериментального зразка покриття (сталь 10ХСНД, 100×50 см), протягом 6 місяців на катері проекту 58155 підтвердили його надійність, ефективність та стійкість до природних та техногенних чинників. Створений полімерний композиційний матеріал для отримання масштабного (24 м²) дослідного зразка НАПЗП. Проведений експрес-аналіз адгезивних властивостей покриття, яке наведено на рис. 7, протягом доби на палубі катера та експериментальних зразках покриттів (корабельна сталь 10ХСНД) підтвердив його високу ефективність (показник стійкості покриття має максимальне значення < 1). Виконане нанесення експериментального зразка нековзного антикорозійного полімерного забарвленого покриття органо-органічного типу розміром 24 м², як «зони безпеки» на палубі катера проекту 58155, який був залучений до бойових дій [13].

Підготовка поверхні під нанесення дослідного покриття піскострумом, ступінь підготовки поверхні – St2. Нанесення пензлем, валиком. Витрати АПП – 0,20–0,27 кг/м². Витрати ОН – 0,5–0,6 кг/м².



Рис. 7. Фотографія НАПЗП на палубі катера проекту 58155

Проведенням протягом **чотирнадцяти місяців моніторингу** стану НАПЗП органо-органічного нерегулярного типу, нанесеного на палубу катера (24 м²), в умовах регулярного тертя особовим складом під час його переміщення цією ділянкою палуби, підтверджено надійність зазначеного вище антикорозійного захисту палуби катера (відсутні порушення цілісності та відшарування) та безпечне знаходження на ній екіпажу [14] (рис. 8 а, б). Термін випробування ефективності та надійності НАПЗП був подовжений понад зазначений вище термін на один рік. Результат отримано той же – висока експлуатаційна ефективність та надійність захисного покриття.

Крім цього, слід відзначити, що створена технологія захисту металевих конструкцій кораблів на базі полімерних покриттів, які мають демпфуючу ефективність, унеможлиблює порушення адгезивного з'єднання полімер – метал під впливом довготривалих динамічних вібраційних навантажень, які призводять до порушення цілісності та відшарування захисного покриття (рис. 8 в).

Таким чином, створення НАПЗП на металевій поверхні кораблів гарантує пролонгований надійний захист екіпажу від ковзання, що унебезпечує його знаходження на палубі, зокрема, а самої металевій поверхні – від агресивних техногенних і природних деструктуючих чинників (соляний туман, морська вода).



а)



б)



в)

Рис. 8. Фотографія КНАПЗП на кормі катера проекту 58155: а) станом на 03.08. 2023 р.; б) станом на 04.10. 2024 р.; в) захисне покриття іншого виробника на катері після експлуатації протягом 1 року

ВИСНОВКИ

1. Розроблено нековзні антикорозійні полімерні забарвлені покриття (НАПЗП) органо-органічного типу на основі суміші сітчастого/лінійного поліуретанів (СПУ/ЛПУ70/30) із різним вмістом органо-органічного наповнювача із пігментом (RAL7040).

2. Властивості створених НАПЗП: стійкість до природних і техногенних деструкуючих чинників, коефіцієнт тертя, за різних умов (середовищ) і різного навантаження $\mu = 0,60-0,83$, демпфуючі властивості $\tan\delta$ за температур $-10\text{ }^{\circ}\text{C} / +25\text{ }^{\circ}\text{C} / +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює відповідно $0,082/0,119/0,175$ і коефіцієнт зносостійкості за надвисоких навантажень ($\Delta < 0,02\%$) до/після дії природних (модельних) деструкуючих чинників відповідають заданим для покриттів, що експлуатуються за екстремальних умов.

3. Випробування за натурних умов зразка НАПЗП (сталь 10ХСНД, 100×50 см), протягом 6 місяців на катері ВМС ЗС України підтвердили його надійність, ефективність та стійкість до природних та техногенних чинників. Позитивні результати випробувань підтверджені відповідним актом.

4. Виконане нанесення нековзного антикорозійного полімерного забарвленого покриття органо-органічного типу, як «зони безпеки» на палубі катера проекту 58155, який був залучений до проведення бойових дій.

5. Проведення протягом чотирнадцяти місяців моніторингу НАПЗП органо-органічного типу, створеного на палубі катера під час його експлуатації, підтвердило надійність антикорозійного захисту палуби катера (відсутні порушення цілісності та відшарування) та його безпечно обслуговування екіпажем. Позитивні результати випробувань підтверджені відповідним актом.

6. Створення НАПЗП гарантує пролонгований надійний захист екіпажу від ковзання та травмування, а металеві поверхні – від руйнування під дією природних та техногенних деструкуючих чинників.

Робота була виконана за цільовою науково-технічною програмою оборонних досліджень НАН України.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. H. Bahramnia, H. M., Semnani, A. Habibolahzadeh & H. Abdoos. Epoxy/polyurethane nanocomposite coatings for anti-erosion/wear applications: A review J. of Composite Materials 2020-09-12. <https://doi.org/10.1177/0021998320908299>
2. Kausar, A. (2019). Interpenetrating polymer network and nanocomposite IPN of polyurethane/epoxy: a review on fundamentals and advancements. Polymer-Plastics Technology and Materials. № 58(7). Pp. 691—706. <https://doi.org/10.1080/25740881.2018.1563114>
3. Sanchez, J. M. Into the Coatings: Anti-Slip Deck Coatings. URL: <https://www.coatingspromag.com/articles/other/2014/11/into-the-coatings-anti-slip-deck-coatings>.
4. Нові захисні матеріали для підвищення експлуатаційної надійності військових об'єктів / Савельєв Ю.В., Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Ахранович О.Р., Савельєва О.О., Литвяков В.І., Олійник К.А. Озброєння та військова техніка. 2020. № 4(28). С. 89—97. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4\(28\).89-97](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4(28).89-97)

5. Властивості полімерних композиційних матеріалів на основі лінійних/сітчастих поліуретанів, модифікованих органо-неорганічними модифікаторами / Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Савельєва О.О., Робота Л.П., Савельєв Ю.В. Полімерний журнал. 2020. № 2. С. 111—120. <https://doi.org/10.15407/polymerj.44.02.111>.
6. Дослідження структури та властивостей поліуретанових композицій, модифікованих металвмісними сполуками / Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Руденко А.В., Савельєва О.О., Остапчук С.М., Савельєв Ю.В. Полімерний журнал. 2020. № 4. С. 283—291. <https://doi.org/10.15407/polymerj.42.04.283>
7. Поліуретанова композиція. Пат. Україна 85111. МПК С08L 75/04, 75/06, 75/08. Савельєв Ю.В., Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Савельєва О.О. Опубл. 11.11.2013. Бюл. № 21.
8. Спосіб отримання поліуретанової композиції. Пат. Україна 90677. МПК С08 J 3/00, С08 J 3/20, С08 К 5/500, С08 L 75/00, С08 L 75/08. Савельєв Ю.В., Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Савельєва О.О. Опубл. 10.06.2014. Бюл. № 11.
9. Спосіб отримання поліуретанової композиції для захисних покриттів. Пат. Україна 90678. МПК С08 J 3/00, С08 J 3/20, С08 К 5/50, С08 L 75/00, С08 L 75/08. Савельєв Ю.В., Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Савельєва О.О. Опубл. 10.06.2014. Бюл. № 11.
10. Спосіб отримання композиційного нековзного антикорозійного поліуретанового забарвленого покриття. Пат. Україна 160751. МПК С08 J 3/20, С08 L 75/04, С08 D 175/04. Савельєв Ю.В., Марковська Л.А., Пархоменко Н.Й., Савельєва О.О. Опубл. 08.10.2025. Бюл. № 41.
11. ДСТУ Б В.2.7-212:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності.

REFERENCES

1. H. Bahramnia, H. M., Semnani, A. Habibolahzadeh & H. Abdoos. Epoxy/polyurethane nanocomposite coatings for anti-erosion/wear applications: A review J. of Composite Materials 2020-09-12. <https://doi.org/10.1177/0021998320908299>
2. Kausar, A. (2019). Interpenetrating polymer network and nanocomposite IPN of polyurethane/epoxy: a review on fundamentals and advancements. Polymer-Plastics Technology and Materials. № 58(7). Pp. 691—706. <https://doi.org/10.1080/25740881.2018.1563114>
3. Sanchez, J. M. Into the Coatings: Anti-Slip Deck Coatings. URL: <https://www.coatingspromag.com/articles/other/2014/11/into-the-coatings-anti-slip-deck-coatings>.
4. Saveliev, Yu.V., Markovskaya, L.A., Parkhomenko, N.Y., Akharanovich, O.R., Savelieva, O.O., Litvyakov, V.I. & Oliinyk, K.A. (2020) “Novi zahysni materialy dlia pidvyshenia ekspluatatsiinoi nadiinosti viiskovykh ob'ektiv. Ozbroiennia ta viiskova tehnika” [New protective materials for improving the operational reliability of military facilities. Weapons and Military Equipment]. No. 4(28). Pp. 89—97. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4\(28\).89-97](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.4(28).89-97)
5. Markovska, L.A., Parkhomenko, N.Y., Savelieva, O.O., Robota, L.P. & Saveliev, Yu.V. (2020). “Vlastyvosti polimernykh kompozitsiinykh materialiv na osnovi

- liniinyh/sitchatykh poliuritaniv, modyfikovanykh organo-neorganichnyimi modyfikatoryami” [Properties of polymer composite materials based on linear/cross-linked polyurethanes modified with organo-inorganic modifiers]. Polymer J. No. 2. Pp. 111–120. <https://doi.org/10.15407/polymerj.44.02.111>.
6. Markovska, L.A., Parkhomenko, N.Y., Rudenko, A.V., Savelieva, O.O., Ostapyuk, S.M. & Saveliev, Y.V. (2020). “Doslidzennia struktury ta vlastyvoستي poliurytanovykh kompozytsii, modyfikovanykh metal-vmisnymi spolukamy” [Investigation of the structure and properties of polyurethane composites modified with metal-containing compounds]. Polymer J. No. 4. Pp. 283–291. <https://doi.org/10.15407/polymerj.42.04.283>.
 7. Ukrainian Pat. No. 85111. MPK C08L 75/04, 75/06, 75/08. “Poliuritanova kompozytsia” [Polyurethane composition]. Y.V. Savelyev, L.A. Markovskaya, N.Y. Parkhomenko, O.O. Savelyeva. Publ. Nov. 11. 2013. Bull. No. 21.
 8. Ukrainian Pat. No. 90677. MPK C08 J 3/00, C08 J 3/20, C08 K 5/500, C08 L 75/00, C08 L 75/08. “Sposib otrymannia poliuritanovoi kompozytsii” [Method for producing a polyurethane composition]. Saveliev Yu.V., Markovskaya L.A., Parkhomenko N.Y., Savelieva O.O. Publ. June 10, 2014. Bull. No. 11.
 9. Ukrainian Pat. No. 90678. MPK C08 J 3/00, C08 J 3/20, C08 K 5/50, C08 L 75/00, C08 L 75/08. “Sposib otrymannia poliuritanovoi kompozytsii dlia zahysnykh pokryttiv” [Method for producing a polyurethane composition for protective coatings]. Savelyev Yu.V., Markovskaya L.A., Parkhomenko N.Y., Savelieva O.O. Publ. 10/06/2014. Bull. No. 11.
 10. Ukrainian Pat. 160751. MPK C08 J 3/20, C08 L 75/04, C08 D 175/04. “Sposib otrymannia kompozytsiinogo nekovznogo antykoroziinogo poliuritanovogo zabarvlenogo pokryttia” [Method for producing a composite non-slip anti-corrosion colored polyurethane coating]. Savelyev Yu.V., Markovska L.A., Parkhomenko N.Y., Savelyeva O.O. Publ. 08.10.2025. Bull. No. 41.
 11. DSTU B V.2.7-212:2009. “Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia styanosti” [Building materials. Concrete. Methods for determining abrasion resistance].

Savelyev Yu.V., Markovskaya L.A., Gonchar O.M., Oliinyk K.A., Shulzhenko Eu.O.

NEW TECHNOLOGIES FOR COMPREHENSIVE PROTECTION OF MILITARY FACILITIES

A comprehensive approach to protecting ship personnel from slipping and injury, as well as safeguarding the metal structures of naval vessels against corrosion, may be implemented through the development of non-slip anticorrosive coatings. In this study, a composite non-slip anticorrosive pigmented polyurethane coating (NSAPC) of an organo-organic type was developed on the basis of a crosslinked/linear polyurethane blend (CPU/LPU, 70/30) with varying contents of an organo-organic filler and pigment (RAL 7040).

The developed NSAPC exhibited resistance to biotic, abiotic, and technogenic destructive factors. Its coefficient

of friction (μ), determined under different environmental conditions and loading regimes, ranged from 0,60 to 0,83. The damping properties ($\tan\delta$) at temperatures of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ were 0,082, 0,119 and 0,175, respectively. The wear resistance coefficient (G) under ultra-high loads was $<0,02\%$. After exposure to natural and model destructive factors, the obtained characteristics complied with the performance requirements established for coatings intended for operation under extreme conditions.

The NSAPC was applied as «safety zones» on the upper deck of a project 58155 patrol boat (Naval Unit A0456). Monitoring of the developed NSAPC over fourteen months of operation, subsequently extended for an additional year, confirmed the reliability of the anticorrosive protection of the ship deck and the safety of its operation and maintenance by the crew.

The developed NSAPC provides reliable protection of the crew against slipping, thereby enabling personnel to perform their duties on deck while minimizing the risk of injury. In addition, it prevents loose objects from sliding during ship rolling. At the same time, the coating ensures effective protection of metal surfaces against aggressive technogenic and natural destructive factors, thus improving their operational performance and service life.

Keywords: military facilities, crew, anti-skid coating, long-term corrosion protection, operational reliability, performance characteristics.

Відомості про авторів:

Савельєв Юрій Васильович

доктор хімічних наук, професор
завідувач відділу
Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН
України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3356-9087>
e-mail: yuri2savelyev@gmail.com

Марковська Людмила Антонівна

кандидат хімічних наук
старший науковий співробітник
Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН
України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-9427-9786>
e-mail: lmarkovskaya@ukr.net

Гончар Олексій Миколайович

кандидат хімічних наук
старший науковий співробітник
Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН
України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8356-9283>
e-mail: -lexgon@gmail.com

Олійник Костянтин Анатолійович

начальник відділу розвитку морських озброєнь –
заступник начальника науково-дослідного управління
розвитку морських озброєнь та техніки
Військово-Морських Сил

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8007-6686>
e-mail: e-uliss90@ukr.net

Шульженко Євген Олексійович
начальник управління експлуатації
і судноремонту озброєння
Командування логістики ВМС
м. Одеса, Україна
e-mail: e-kardinal5502@gmail.com

Information about the authors:

Savelyev Yuri
Doctor of Chemistry Sciences, Professor
Head of the Department of Heterochain Polymer
Chemistry & Interpenetrating Polymer Networks
Institute of Macromolecular Chemistry
NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3356-9087>
e-mail: yuri2savelyev@gmail.com

Markovskaya Ludmila
Candidate of Chemistry Sciences
Senior Research of Institute of Macromolecular
Chemistry NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-9427-9786>
e-mail: lmarkovskaya@ukr.net

Gonchar Oleksii
Candidate of Chemistry Sciences
Senior Research of Institute of Macromolecular Chemistry
NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8356-9283>
e-mail: lexgon@gmail.com

Oliinyk Kostiantyn
Head of the Naval Weapons Development Department –
Deputy Head of the Research and Development
Department for Naval Weapons and Equipment
of the Navy
Central Scientific Research Institute of Armament
and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8007-6686>
e-mail: uliss90@ukr.net

Shulzhenko Eugene
Head of the Armament Operations and Ship Repair
Department
Navy Logistics Command
Odesa, Ukraine
e-mail: kardinal5502@gmail.com

Стаття прийнята до редколегії 14.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 623.4, 355.4, 621.396.96

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).105-110](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).105-110)**А. М. КАЦАН**<https://orcid.org/0000-0002-4338-103X>**А. Ю. БУНТОВ**<https://orcid.org/0009-0006-8697-1642>*(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)*

ГІПЕРЗВУКОВІ ПРОТИКОРАБЕЛЬНІ РАКЕТИ: РЕАЛЬНІ ПЕРЕВАГИ, ОБМЕЖЕННЯ ТА УМОВИ БОЙОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НА МОРІ

У статті розглянуто гіперзвукові протикорабельні ракети (ПКР) як елемент сучасних морських засобів ураження та як складову ширшого ланцюга «виявлення – супроводження – цілевказання – удар – оцінка результату». Проаналізовано, які саме властивості гіперзвуку формують пріоритет бойової ефективності, а які лише ускладнюють реалізацію системи в цілому. Показано, що «гіперзвук» не є самодостатнім фактором переваги, вирішальними залишаються розвідка, видача цілевказання, стійкість каналів управління і корекції на маршовій ділянці, а також наведення на ціль в умовах активної протидії. Особливу увагу приділено різниці між гіперзвуковими крилатими, балістичними та квазібалістичними протикорабельними ракетами, особливостям їхніх траєкторій, а також залежності реальної ефективності від профілю польоту, щільності залпу, рівня мультидоменного забезпечення та готовності противника до відбиття комбінованого удару. Визначено умови, за яких гіперзвукові ПКР дають максимальний ефект, і ті обмеження, які знижують їхню практичну результативність під час ураження рухомих морських цілей на великих дальностях.

Ключові слова: *гіперзвукова ПКР, протикорабельна боротьба, цілевказання, протиповітряна оборона корабля, радіоелектронна боротьба, ланцюг ураження цілі, маневр на кінцевій ділянці, комбінований ракетний удар, маршова корекція, морська ціль.*

ВСТУП

Гіперзвукові ПКР розглядаються як відповідь на еволюцію корабельної протиповітряної оборони (ППО) та зростання ролі багатошарових оборонних контурів – від дальньої зони перехоплення до систем ближньої самооборони. Для морського театру бойових дій це має особливе значення, оскільки корабельне з'єднання поєднує в собі велику вогневу міць, засоби розвідки, протиповітряної оборони, радіоелектронної боротьби (РЕБ)

та систему управління. Відповідно, успішне ураження такого об'єкта вимагає не лише потужної бойової частини ракети, а й здатності подолати весь оборонний цикл – від раннього виявлення до кінцевого перехоплення.

Морське середовище накладає специфічні обмеження. Ціль є мобільною, здатною маневрувати, змінювати курс і швидкість, діяти у складі з'єднання кораблів, прикриватися іншими кораблями, застосовувати активні та пасивні завади, хибні цілі, режими радіомовчання та маскування. Крім того, дальність виявлення надводних цілей обмежується радіогоризонтом, а точність цілевказання знижується зі зростанням відстані та часу польоту. Саме тому оцінка гіперзвукових ПКР має здійснюватися не тільки за показником швидкості, а як аналіз системи «розвідка – управління – ураження – оцінка результату».

Інакше кажучи, питання полягає не в тому, чи може ракета летіти зі швидкістю понад 5 М, а в тому, чи здатна вся система бойового застосування вивести її в актуальний район цілі, своєчасно скоригувати маршрут, забезпечити захоплення корабля головкою самонаведення та зберегти стійкість до протидії на всіх етапах польоту. У практичному вимірі саме ця системність відділяє технологічно складний виріб від дійсно ефективного засобу протикорабельної боротьби.

Метою статті є дослідження умов, що впливають на ефективність застосування гіперзвукових протикорабельних ракет.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розрізняють основні підкласи гіперзвукових протикорабельних ракет:

- гіперзвукові крилаті ракети (3М22 «Циркон» виробництва РФ);
- протикорабельні гіперзвукові балістичні ракети (YJ-21, DF-21D виробництва КНР);
- квазібалістичні гіперзвукові ракети (балістична траєкторія та кероване маневрування) (LR-AShM / LRAShM виробництва Індії).

Поділ на ці підкласи має не лише описовий, а й прикладний характер. Різні типи траєкторій безпосередньо визначають вимоги до зовнішнього цілевказання, стійкості до раннього виявлення, час реакції на корабельну ППО, допустимі режими маневрування та особливості роботи головки самонаведення на кінцевій ділянці. Наприклад, висотний профіль балістичної ракети може забезпечувати велику дальність і високу швидкість зниження, але одночасно робить атаку помітнішою для засобів попередження і пов'язує ефективність з точністю оновлення координат цілі. Натомість крилата гіперзвукова ракета у щільних шарах атмосфери має потенційно більш гнучкий маршрут, однак стикається з вищими аеротермічними навантаженнями на довгій маршовій ділянці.

Основний пріоритет бойової ефективності гіперзвукових ПКР вказано в табл. 1, забезпечує зменшення часу реакції корабельної ППО. Скорочення часу на класифікацію цілі, прийняття рішення, розподіл каналів супроводу та наведення перехоплювачів знижує ймовірність організованої протидії, особливо в умовах комбінова-

Таблиця 1. Оцінка переваг та обмежень гіперзвукової ПКР

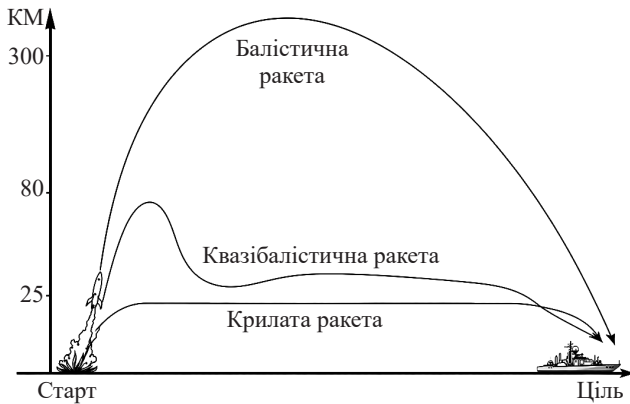
Параметр	Позитивний вплив	Обмеження	Висновок
Скорочення часу реакції корабельної ППО	Висока швидкість польоту зменшує час на виявлення, класифікацію цілі, прийняття рішення, розподіл каналів супроводу та наведення засобів перехоплення. Це підвищує ймовірність прориву оборони.	Ефект залежить від реального рівня автоматизації та готовності системи ППО. За наявності розвинених засобів раннього попередження і автоматизованого бойового управління цей ефект може бути частково знижений.	Перевага є суттєвою, але її практична цінність визначається не лише швидкістю ракети, а й характеристиками системи оборони цілі.
Дія в умовах комбінованої атаки	Скорочення часу реагування ускладнює координацію дій оборони під час одночасного застосування кількох засобів ураження. Це створює передумови для перевантаження корабельної ППО.	Сам по собі високий темп атаки не гарантує прориву, якщо оборона має достатню кількість каналів супроводу, боєкомплект перехоплювачів і стійку систему управління.	Гіперзвукова ПКР найбільш ефективна як елемент комплексного удару, а не як ізольований засіб ураження.
Кінетична енергія влучання	Висока швидкість забезпечує значну кінетичну енергію удару, що посилює ефект ураження навіть за відносно невеликої маси бойової частини.	Реалізація цієї переваги безпосередньо залежить від точності наведення та здатності ракети забезпечити фактичне влучання у ціль.	Кінетична енергія є важливим підсилювачем бойового ефекту, але не компенсує недоліки у системі наведення.
Нетипові профілі польоту	Зміни висоти, швидкості та траєкторії польоту ускладнюють прогнозування точки перехоплення, що знижує ефективність оборонної реакції.	Складні профілі польоту висувають підвищені вимоги до аеродинамічної стійкості, систем управління та надійності ракети на маршовій і кінцевій ділянках.	Маневрування підвищує бойову стійкість ракети до перехоплення, але технологічно ускладнює сам виріб.
Витрати ресурсів ППО	Для протидії такій загрозі оборона змушена витратити більше часу, каналів супроводу, ракет-перехоплювачів і ресурсів системи управління.	Цей ефект зменшується, якщо корабельна ППО має багатопарову структуру, високу щільність вогню та достатній запас боєприпасів.	Перевага має характер відносного виснаження оборони і проявляється насамперед у тривалих або масованих атаках.
Скорочення «вікна невизначеності» для оборони	Менший час підльоту зменшує можливості ППО щодо уточнення обстановки, повторної класифікації загрози та побудови оптимального алгоритму відбиття атаки.	Якщо засоби виявлення і бойового управління працюють із мінімальними затримками, перевага від скорочення цього часу може бути частково нівельована.	Швидкість є важливою не сама по собі, а як чинник зменшення часу на адаптацію оборони до загрози.
Скорочення «вікна старіння даних» для атакуючої сторони	Менший час польоту знижує ймовірність застарівання даних про місцезнаходження морської цілі, що підвищує шанси на успішне наведення.	За відсутності точного цілевказання або корекції в польоті навіть мала тривалість польоту не усуває проблему похибки цілевказання.	Для морських цілей перевага швидкості безпосередньо пов'язана з якістю зовнішнього цілевказання та можливістю оновлення даних.
Залежність від цілевказання і корекції	За наявності точного зовнішнього цілевказання та механізмів корекції траєкторії гіперзвукова ПКР здатна суттєво підвищити ймовірність ураження цілі.	Без якісного цілевказання або без можливості корекції ракета не може повною мірою реалізувати перевагу високої швидкості, особливо проти маневруючої морської цілі.	Ключовою умовою високої бойової ефективності є не лише швидкість, а інтеграція ракети в розвідувально-ударний контур.
Загальна бойова ефективність	У сприятливих умовах гіперзвукова ПКР здатна підвищити ймовірність прориву оборони, посилити ефект ураження та ускладнити роботу ППО.	Переоцінка ролі швидкості без урахування точності, цілевказання, корекції та характеру цілі може призвести до хибних висновків щодо реальної ефективності.	Бойова ефективність гіперзвукової ПКР визначається сукупністю швидкості, точності, якості цілевказання, маневреності та умов застосування, а не швидкістю як ізольованою характеристикою.

ної атаки. Інша перевага полягає у високій кінетичній енергії влучання, яка посилює руйнівний ефект навіть за відносно компактною бойовою частиною. Наступна перевага – можливість використання нетипових профілів польоту: зміни висоти, швидкості та траєкторії ускладнюють прогнозування точки перехоплення і змушують ППО витратити більше часу, ракет-перехоплювачів та ресурсів систем управління.

Разом з тим, перевага у швидкості не повинна трактуватися спрощено. Для морської цілі вирішальним є не сам факт швидкого польоту, а те, наскільки ця швидкість скорочує «вікно невизначеності» для оборони та «вікно старіння даних» для атакуючої сторони. Якщо гіперзвукова ракета отримує якісне цілевказання і має можливість корекції, менший час польоту дійсно підвищує ймовірність зустрічі з ціллю. Якщо ж таких умов

немає, навіть дуже високі швидкісні характеристики не компенсують помилку у визначенні місця корабля на кінцевому етапі.

На рис. 1 наведено типові траєкторії польоту гіперзвукових протикорабельних ракет.



Р и с . 1. Траєкторії польоту гіперзвукових протикорабельних ракет

Балістичні гіперзвукові ПКР мають класичну балістичну траєкторію: старт, набір висоти, апогей 300–500 км та різке зниження на ціль. Крилата гіперзвукова ракета, як правило, виконує старт, набір висоти, маршовий аеродинамічний політ в атмосфері на висоті порядку 20–30 км, а потім маневрує під час заходу на ціль. Квазібалістична гіперзвукова ПКР поєднує ознаки обох підходів: початкова ділянка нагадує балістичну, але політ проходить у верхніх шарах атмосфери з активним маневруванням перед ураженням цілі.

З військово-практичного погляду різниця між цими траєкторіями визначає і модель протидії. Балістичний профіль вигідний для атаки на великій дальності, але відкриває ціль для космічних, радіолокаційних і корабельних засобів попередження раніше, ніж низьковисотний профіль дозвукової ПКР. Крилатий гіперзвуковий профіль ускладнює виявлення через більшу гнучкість маршруту, але потребує стійкого управління на довгому атмосферному відрізу. Квазібалістичний профіль є ком-

промісом: він зменшує передбачуваність і водночас зберігає значний швидкісний потенціал на кінцевій ділянці.

У табл. 2 наведено основні тактико-технічні характеристики (ТТХ) гіперзвукових протикорабельних ракет різних країн світу.

Наведені характеристики демонструють, що за формально схожого «гіперзвукового» статусу ці ракети вирішують різні задачі й спираються на різні операційні моделі. Частина систем більше придатна для ураження цілей у межах берегового протикорабельного контуру, інші – для розширення можливостей корабельних угруповань на дальніх рубіжах. Тому порівняння лише за максимальною швидкістю або дальністю є методично неповним. Коректніше порівнювати ракети за сукупністю ознак: характер траєкторії, вимоги до цілевказання, тип носія, очікуваний час польоту, навантаження на систему наведення та вартість забезпечення бойового застосування.

У табл. 3 наведено час польоту гіперзвукових ракет на дальності від 100 до 1500 км на швидкостях від 5 до 9 М.

Т а б л и ц я 3. Час польоту гіперзвукових ракет на різні дальності

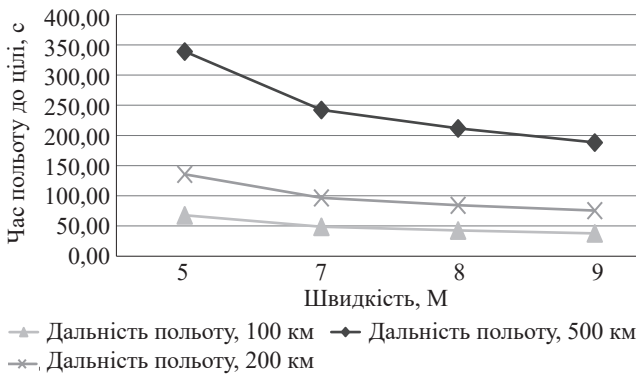
Швидкість, М	5	7	8	9
Дальність польоту, км	Час польоту, хв.			
100	1.13	0.81	0.71	0.63
200	2.26	1.61	1.41	1.26
500	5.65	4.04	3.53	3.14
1000	11.30	8.07	7.06	6.28
1500	16.95	12.11	10.59	9.42

На рис. 2 та 3 наведено аналогічні дані на оперативнотактичну та стратегічну дальність польоту, відповідно, у графічному вигляді.

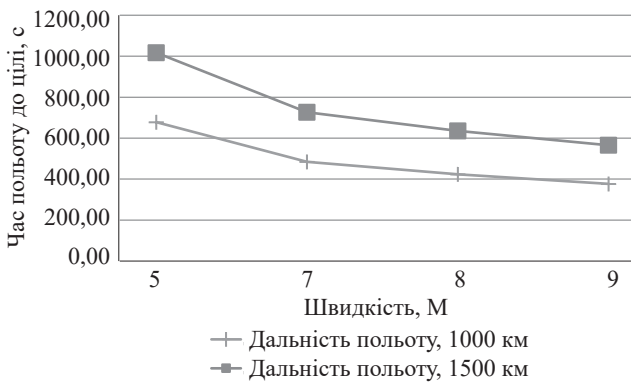
З даних наведених у табл. 3 та на рис. 2 та 3 робимо висновок, що вказано час польоту гіперзвукових ракет та показується головна тактична перевага гіперзвуку: за дальності 1000–1500 км часовий ресурс оборони

Т а б л и ц я 2. ТТХ гіперзвукових протикорабельних ракет

Ракета	Підклас/тип	Дальність, км	Швидкість, М	Висота апогея, км	Бойова частина, кг	Наведення (відоме/ймовірне)	Носії
3M22 (рф)	Гіперзвукова крилата ПКР	до ~1000	до 6.2 (оцінка)	25	проникаюча ОФ 185	INS+GPS+ГСН	Кораблі/ мобільні наземні (берегові) комплекси
YJ-21 (КНР)	Гіперзвукова протикорабельна балістична	~1500 (заявлено)	~6-10 (заявлено)	~300-500	конвенційна БЧ (заявлено)	INS+GPS+ГСН	Кораблі
DF-21D (КНР)	Гіперзвукова протикорабельна балістична	~1500 (заявлено)	до ~10 (заявлено)	~300-500	конвенційна БЧ ~600	INS+GPS+ГСН	Мобільні наземні (берегові) комплекси
LR-AShM / LRAShM (Індія)	Квазібалістична гіперзвукова протикорабельна ракета	>1500 (заявлено)	до ~10 (заявлено)	~80	конвенційна БЧ	INS+GPS+ГСН	Мобільні наземні (берегові) комплекси



Р и с . 2. Час польоту гіперзвукових ракет на оперативну-тактичну дальність польоту



Р и с . 3. Час польоту гіперзвукових ракет на стратегічну дальність польоту

може скорочуватися до приблизно 6–12 хвилин, а для окремих ділянок маршруту – ще менше, якщо частина польоту відбувається за межами стійкого супроводу. Однак, під час ведення бойових дій на морі така перевага у часі важлива не сама по собі, а як фактор, що впливає на цикл «виявлення – рішення – розподіл засобів – пуск перехоплювачів – повторне перехоплення». Чим менше часу має корабельне угруповання, тим важче йому своєчасно перерозподіляти канали наведення, оновлювати картину повітряної обстановки, відрізнити справжні цілі від хибних і координувати дії між кораблями з'єднання.

Водночас зменшення часу польоту не скасовує необхідності точного прогнозування руху цілі. Наприклад, якщо корабель змінює курс або швидкість під час підходу ракети, помилка у розрахунку точки зустрічі зростає разом з дальністю пуску. Тому, навіть за 6-10 хвилин польоту на великих рубіжах потрібні або дуже точні початкові дані, або канал корекції, здатний оновлювати інформацію про місцеположення корабля майже в реальному масштабі часу.

СИСТЕМНІ ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ ГІПЕРЗВУКОВОЇ ПКР

Важливо, що переваги гіперзвукових ПКР проявляються максимальним чином лише за наявності високої щільності ракетного удару або комбінування з іншими засобами – дозвуковими та надзвуковими ПКР, безпілотними літальними апаратами (БПЛА), постановниками активних і пасивних перешкод, а також ударами по зовнішніх сенсорах і командних пунктах противника. Сам

по собі гіперзвук не гарантує прориву, він лише змінює баланс часу, навантаження та складності задачі для ППО.

У практичному сенсі гіперзвукова ракета найбільш небезпечна не тоді, коли летить окремо, а тоді, коли входить до складу різнорідного залпу. Повільніші цілі можуть примушувати оборону відкривати вогонь і витрачати боєкомплект раніше, БПЛА – перевантажувати систему супроводу та каналів наведення, а засоби РЕБ – знижувати якість радіолокаційного поля. У такій конфігурації високошвидкісна ракета використовує не лише власні характеристики, а й ефект «розтягування» оборони в часі та просторі.

В табл. 4 вказано ряд технічних і операційних «вузьких місць» які мають гіперзвукові ПКР.

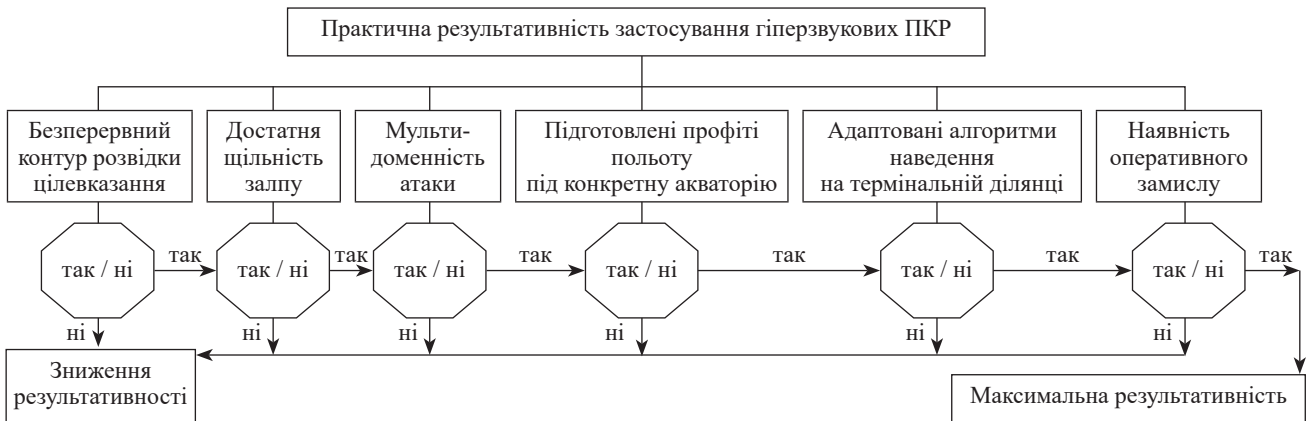
Т а б л и ц я 4. Фактори, що обмежують бойову ефективність гіперзвукової ПКР

№	Фактор	Короткий опис
1	Старіння даних цілевказання	Ефективність ураження залежить від здатності своєчасно оновлювати координати рухомої морської цілі.
2	Обмеження кінцевого наведення	Гіперзвуковий режим польоту ускладнює стійке захоплення, супровід і точне наведення на ціль.
3	Уразливість мережевого контуру	Складний ланцюг зовнішнього забезпечення створює додаткові точки відмови під впливом радіоелектронної боротьби та інших чинників.
4	Профіль польоту як компроміс	Вибір висоти польоту визначає баланс між дальністю, швидкістю, помітністю та маневреністю ракети.

Перший основний фактор – цілевказання по рухомій морській цілі. На дальніх рубіжах координати корабля швидко змінюються, відбувається старіння даних цілевказання. Якщо ракета не має надійного каналу корекції на маршовій ділянці – через супутник, літак дальнього радіолокаційного виявлення, БПЛА, надводний або підводний ретранслятор, зростає ризик виходу в район, де цілі вже немає, і, відповідно, поза зоною пошуку її головки самонаведення. У цьому сенсі гіперзвукова ПКР часто є «заручником» не двигуна й аеродинаміки, а зовнішньої розвідки та мережевих контурів.

Другий фактор – наведення на кінцевій ділянці. На гіперзвукових швидкостях виникають серйозні обмеження для радіолокаційних і оптико-електронних головок самонаведення: інтенсивне теплове навантаження, плазмові ефекти, великі вимоги до обчислювальної частини, алгоритмів фільтрації завад та точності органів керування. Маневр у щільних шарах атмосфери при високій швидкості пов'язаний з великими перевантаженнями, що зменшує запас на помилку та підвищує ризик втрати стійкості.

Третій фактор – вразливість ланцюга управління. Будь-які канали передачі даних і корекції можуть бути придушені засобами РЕБ, порушені через фізичне знищення носіїв-розвідників, деградацію супутникової навігації або несприятливі метеоумови. Що більше, чим складніший ланцюг зовнішнього забезпечення, тим більше точок відмови виникає у всієї системи застосування.



Р и с . 4. Загальний алгоритм практичного застосування гіперзвукових ПКР

Четвертий фактор – компроміс між висотою, помітністю та маневреністю. Висотний профіль може збільшувати дальність і швидкість, але підвищує ймовірність раннього виявлення. Нижчий профіль зменшує час на реакцію оборони на фінальній ділянці, проте ускладнює збереження гіперзвукової швидкості та потребує точнішого обходу рельєфу атмосфери, зон патрулювання і секторів дії корабельних сенсорів.

Окремо слід відзначити економічно-логістичні обмеження. Гіперзвукові системи складніші у виробництві, дорожчі в експлуатаційному циклі, вимогливі до надійності матеріалів, контролю якості та випробувальної інфраструктури. Це знижує можливість масованого застосування і часто зміщує такі ракети до ролі засобу першого удару, демонстрації сили або політичного стримування, а не масового інструмента щоденної боротьби за море.

Саме тому у військово-морській практиці доцільно оцінювати не «абсолютну» небезпечність гіперзвукової ПКР, а співвідношення «ефект – вартість – вимоги до забезпечення». Для окремих сценаріїв дешевший надзвуковий або навіть дозвуковий вибір у поєднанні з грамотним цілевказанням, РЕБ і масованим залпом може виявитися не менш загрозливим, ніж одиничний пуск високотехнологічної гіперзвукової ракети.

УМОВИ, ЗА ЯКИХ ГІПЕРЗВУК ДАЄ МАКСИМАЛЬНИЙ ЕФЕКТ

Практична результативність гіперзвукових ПКР зростає, коли виконані кілька взаємопов'язаних умов, рис. 4:

- безперервний контур розвідки й цілевказання: супутники, БПЛА, літаки-розвідники, надводні кораблі або інші носії повинні забезпечувати оновлення даних у часовому масштабі, співрозмірному з часом польоту ракети;
- мультидоменність атаки: поєднання гіперзвукових ракет з БПЛА, засобами РЕБ, хибними цілями, ударами по зовнішніх сенсорах і командних пунктах;
- достатня щільність залпу для переважання каналів супроводу, наведення та боекомплекту систем ППО;
- підготовлені профілі польоту під конкретну акваторію: вибір висот, маршрутів, секторів підходу і моменту переходу на кінцеву ділянку з урахуванням ймовірної схеми бойового порядку противника;

– адаптовані алгоритми наведення на термінальній ділянці, здатні працювати в умовах маневру цілі, перешкод та неповноти зовнішньої інформації.

До цих умов доцільно додати ще одну – наявність оперативного замислу, в якому гіперзвукова ПКР застосовується за призначенням. Вона найбільш виправдана проти високовартісних цілей: кораблів протиповітряної оборони з'єднання, великих десантних кораблів, авіаносних або універсальних ударних платформ, важливих кораблів управління і забезпечення. Використання дорогого високотехнологічного засобу проти другорядних або добре доступних цілей знижує загальну ефективність кампанії.

Не менш важливим є питання часу і моменту пуску. У морській війні навіть потужна ракета може дати обмежений ефект, якщо запуск виконано тоді, коли противник уже розгорнув бойовий порядок, підняв авіацію, ввів режим повної готовності ППО і перевів сенсори в активний режим. Натомість раптовість, застосування у момент зміни з'єднання, під час переходу через проливи, у зоні складної метеорології або за умови паралельного інформаційного і радіоелектронного впливу значно підвищують шанси на результат.

Отже, гіперзвук не є «чарівною властивістю» ракети. Це прискорювач ефективності вже налагодженого розвідувально-ударного контуру. Якщо контур слабкий, перевага гіперзвуку частково втрачається; якщо ж контур стійкий, швидкість і маневреність дають якісно новий рівень загрози для корабельної оборони.

ВИСНОВКИ

Гіперзвукові ПКР мають важливі тактичні переваги, насамперед через скорочення часу реакції корабельної ППО, підвищення кінетичної складової ураження та ускладнення задачі перехоплення внаслідок високої швидкості й маневрування. Разом із тим їхні ключові обмеження лежать не стільки у площині «чистої» аеродинаміки, скільки в системності бойового застосування – у достовірному цілевказанні по рухомій морській цілі, стабільній корекції на маршовій ділянці, стійкому захопленні цілі в умовах РЕБ та збереженні керованості на термінальному етапі.

Порівняльний аналіз свідчить, що реальна бойова цінність гіперзвукової протикорабельної ракети визначається не максимальною швидкістю як такою, а здат-

ністю всієї системи забезпечити своєчасне зближення ракети з актуальним положенням цілі. Саме тому успішне застосування протикорабельних угруповань вимагає інтеграції космічної, повітряної, морської та інформаційної складових. Без цього навіть високошвидкісний виріб може залишатися скоріше демонстратором технології, ніж гарантованим засобом ураження.

Отже, «гіперзвук» підвищує ймовірність прориву лише тоді, коли наявний повний мережево-розвідувальний контур, забезпечена мультидоменна підтримка атаки, а профіль бойового застосування підібрано з урахуванням конкретної акваторії, характеру цілі та готовності противника до відбиття удару. Для практичного планування розвитку морського озброєння це означає, що розробляти та інвестувати потрібно не лише в самі ракети, а й у розвідку, зв'язок, системи передачі даних, РЕБ, засоби масування удару та алгоритми бойового управління. Саме там формується реальна ефективність гіперзвукової протикорабельної зброї на морі.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ / REFERENCES

1. John, T. Watts, Christian Trotti & Mark J. Hypersonic Weapons in the Indo-Pacific Region. Massa Scowcroft Center for Strategy and Security. 36 p. URL: [Hypersonics-Weapons-Primer-Report.pdf](#) (accessed 04.03.2025).
2. Hypersonic Missiles: Threat and Deterrence? Yehoshua Kalisky. June 11, 2023 URL: <https://www.inss.org.il/wp-content/uploads/2023/06/special-publication-110623.pdf> (accessed 04.03.2025).
3. ANNUAL REPORT TO CONGRESS: MILITARY AND SECURITY DEVELOPMENTS INVOLVING THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA 2025. URL: <https://media.defense.gov/2025/dec/23/2003849070/-1/-1/1/annual-report-to-congress-military-and-security-developments-involving-the-peoples-republic-of-china-2025.pdf> (accessed 04.03.2025).
4. Missiles of the WorldChinaDF-21 (CSS-5). URL: <https://missilethreat.csis.org/missile/df-21/> (accessed 04.03.2025).
5. China Launches Antiship Ballistic Missiles in Test. August 27, 2020. Masao Dahlgren. URL: <https://missilethreat.csis.org/china-launches-antiship-ballistic-missiles-in-test/> (accessed 04.03.2025).
6. Shaan Shaikh. Russia Test Fires Zircon Hypersonic Missile. November 29, 2021. URL: <https://missilethreat.csis.org/russia-test-fires-zircon-hypersonic-missile/> (accessed 04.03.2025).
7. India to develop BrahMos-II missile. 03 Aug, 2009. URL: <https://www.brahmos.com/press-release/95> (accessed 04.03.2025).

Katsan A.M., Byntov A.Yu.

HYPERSONIC ANTI-SHIP MISSILES: REAL ADVANTAGES, LIMITATIONS, AND CONDITIONS FOR COMBAT EFFECTIVENESS AT SEA

The article examines hypersonic anti-ship missiles (ASM) as an element of modern naval weapons and as part of a broader chain of «detection – tracking – targeting – strike – assessment of results». It analyzes which properties of

hypersonic technology increase combat effectiveness and which only complicate the implementation of the system as a whole. It is shown that “hypersonic” is not a self-sufficient factor of advantage; reconnaissance, target designation, stability of control and correction channels in the cruise phase, as well as targeting in conditions of active countermeasures remain decisive. Particular attention is paid to the differences between hypersonic cruise, ballistic, and quasi-ballistic anti-ship missiles, the characteristics of their trajectories, and the dependence of their actual effectiveness on flight profile, salvo density, level of multi-domain support, and the enemy's readiness to repel a combined strike. The conditions under which hypersonic anti-ship missiles are most effective are identified, as well as the limitations that reduce their practical effectiveness when striking moving maritime targets at long ranges.

Keywords: hypersonic anti-ship missile, anti-ship warfare, target designation, ship air defense, electronic warfare, target engagement chain, terminal maneuver, combined missile strike, cruise correction, maritime target.

Відомості про авторів:

Кацан Андрій Миколайович

старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4338-103X>
e-mail: bolus1968@ukr.net

Бунтов Антон Юрійович

молодший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-8697-1642>
e-mail: a.buntov@yahoo.com

Information about of authors:

Katsan Andrij

Chief Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4338-103X>
e-mail: bolus1968@ukr.net

Buntov Anton

Junior Research Fellow
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-8697-1642>
e-mail: a.buntov@yahoo.com

Стаття надійшла до редколегії 06.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 623.983

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).111-115](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).111-115)

О. Г. ЛЕЙКО, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-5588-6449>
(Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ)

О. О. КОЧАРЯН, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-3164-0129>

О. М. ПОЗДНЯКОВА, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СТАНЦІЙ З ГНУЧКИМИ ПРОТЯЖНИМИ ГІДРОАКУСТИЧНИМИ АНТЕНАМИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЇХ В ГЛИБОКИХ МОРЯХ І В ПРИСУТНОСТІ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ

Визначено, що ефективності застосування гідроакустичних станцій (ГАС) з гнучкими протяжними буксируваними антенами (ГПБА) в глибоких морях і морях з наявністю обмежуючих границь суттєво відрізняються між собою. Встановлені причини виникнення цієї різниці. Вони пов'язані з роботою ГАС з ГПБА в інфразвуковому і низькому звуковому діапазонах робочих частот. Показано, що в цьому діапазоні частот морська поверхня формує характеристику спрямованості у вигляді диполя. В той же час характеристика спрямованості елементів ГПБА відповідає умовам формування монополя. Суперпозиція звукових полів диполя і монополя в системі тіл «морська поверхня – ГПБА» при малих хвильових розмірах заглиблення ГПБА характеризується формуванням характеристики спрямованості системи тіл у вигляді кардіоїди. Показано, що саме така характеристика спрямованості суттєво змінює ефективність застосування ГАС з ГПБА в зоні впливу морської поверхні. Для глибин, менших глибини занурення ГПБА, ГАС з ГПБА повністю втрачає можливість висвітлення стану підводної обстановки на морській поверхні і в товщі моря до глибини заглиблення ГПБА. Для глибин моря, більших глибини заглиблення ГПБА, ефективність застосування ГАС з ГПБА суттєво залежить від напряму

нахилу основної пелюстки характеристики спрямованості ГПБА до її поздовжньої осі і зменшується при його збільшенні.

Ключові слова: гнучка протяжна антена, морська поверхня, ефективність станції, коефіцієнт концентрації.

ВСТУП

При розробці зразків гідроакустичної техніки була прийнята наступна практика. Розробка всіх нових гідроакустичних станцій (ГАС) або комплексів (ГАК) здійснювалась для умов безмежного морського середовища. Це було обумовлено тим, що необхідна кількість розроблюваних ГАС і ГАК, потрібних для оснащення надводних кораблів (НК) та підводних човнів (ПЧ), була значно меншою кількості цих НК і ПЧ. При такому підході зміна параметрів ГАС при розміщенні їх на носіях або в морському середовищі визначається для кожного випадку окремо і являє собою складну фізико-математичну задачу.

Процес розробки ГАС з гнучкими протяжними антенами не є виключенням з цього правила. Але ситуація з їх експлуатацією має кілька особливостей. По-перше, ГПБА являють собою в більшості випадків лінійні дискретні еквідистантні п'єзокерамічні антени, що працюють в діапазоні інфразвукових та низьких звукових частот 10–2000 Гц. Це обумовлено тим, що саме на цих частотах дальність поширення звукових хвиль, що генеруються надводними кораблями чи підводними човнами при їх русі, є найбільшою. Але для таких частот будь-яке море втрачає свою глибокiсть. В ньому з'являються обмежуючі поверхні у вигляді морської поверхні, морського дна або поверхонь морських хвильоводів [1–4]. Звичайно, що проява в морі наведених фізичних границь повинна певним чином впливати на ефективність застосування ГАС з ГПБА.

Метою роботи є визначення кількісних характеристик ефективності ГАС з ГПБА при експлуатації їх в зоні впливу морської поверхні і порівняння отриманих значень зі значеннями ефективності таких же ГАС з ГПБА в безмежному морському просторі. В якості критерію ефективності ГАС з ГПБА виберемо її коефіцієнт концентрації.

ПОСТАНОВКА І РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Визначимо кількісні значення коефіцієнта концентрації ГАС з ГПБА в присутності впливу обмежуючої морської поверхні у вигляді морської поверхні. При побудові розрахункової моделі будемо виходити із наступного.

Відносно ГПБА приймемо, що вона являє собою лінійну еквідистантну антенну решітку, утворену із п'єзокерамічних перетворювачів. Ці гідроакустичні перетворювачі виконуються, як це прийнято в реальних ГПБА, у вигляді кругових п'єзокерамічних циліндрів зовнішнім діаметром 18 мм і внутрішнім – 16 мм. Внутрішній простір перетворювачів заповнений повітрям або вакуумований. Циліндри мають довжини близько 40 мм і розміщені вздовж поздовжньої осі ГПБА з кроком, який залежить від того, який діапазон частот використовується в ГАС з ГПБА. Оскільки ці ГАС призначені для

роботи в області інфразвукових та низьких звукових частот, їх гідроакустичні перетворювачі характеризуються відсутністю будь-якої спрямованості. Конструкція ГПБА являє собою шланг, заповнений спеціальною рідиною, наприклад, напалмом, яка гарантує нейтральну плавучість ГПБА при її експлуатації.

ГАС з ГПБА забезпечують висвітлення підводної обстановки в заданих районах світового океану. Для цього вони формують характеристики спрямованості R_a із заданим кроком по кутам [5, 6] та θ_a :

$$R(\theta, \theta_0) = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n e^{-iKd(q-1)} (\sin\theta - \sin\theta_0). \quad (1)$$

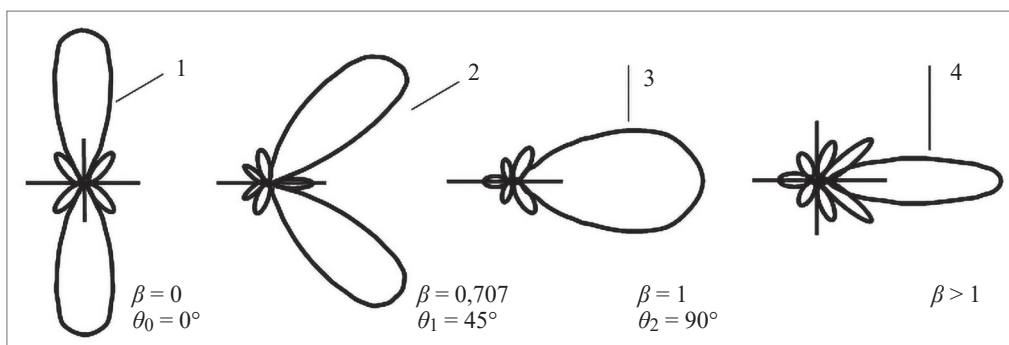
Використовуючи формулу (1), можливо визначити характеристику спрямованості ГПБА при будь-якій її довжині l , робочій довжині хвилі λ і будь-якому куті θ_0 її компенсації.

Різні типи характеристик спрямованості ГПБА при різних кутах θ_0 компенсації антени і різній ширині її пелюстки на рівні 0,707 наведені на рис. 1.

На рис. 1. позначено: 1 – дископодібна ($\theta_0 = 0^\circ; \beta = 0$); 2 – воронкоподібна ($\theta_0 = 45^\circ; \beta = 0,707$); 3 – конусоподібна одностороння ($\theta_0 = 90^\circ; \beta = 1$); 4 – конусоподібна одностороння ($\theta_0 = 90^\circ; \beta > 1$). Важливо відмітити, що в площині, нормальній до поздовжньої осі ГПБА, характеристика спрямованості її перетворювача являє собою монополь.

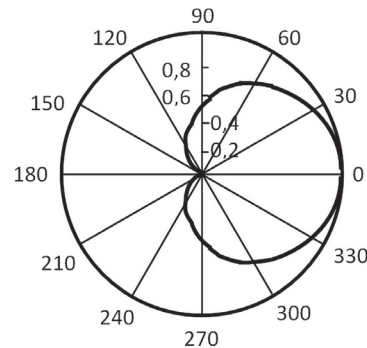
В розрахунковій моделі морської поверхні врахуємо наступні фізичні фактори. Морська поверхня являє собою границю розподілу «повітря – вода». При розгляді цієї границі зі сторони моря вона характеризується всіма ознаками як акустично м'яка поверхня. Оскільки робочим діапазоном частот ГАС з ГПБА є діапазон інфразвукових і низьких звукових частот, то хвилюванням морської поверхні, яке майже завжди існує, можливо знехтувати і вважати морську поверхню плоскою [1, 2, 4]. Такі поверхні формують характеристику спрямованості у вигляді диполя. В дальньому полі ($kr \gg 1$) поле дипольного джерела має вигляд сферичної хвилі з характеристикою спрямованості, що визначається функцією косинуса [7] в напрямі, нормальному до морської поверхні.

Таким чином, коли ГПБА знаходяться при експлуатації в зоні впливу морської поверхні, маємо ситуацію суперпозиції звукових полів двох джерел: морської поверхні у вигляді диполя і ГПБА у вигляді монополя.



Р и с . 1. Різні типи характеристики спрямованості ГПБА в безмежному просторі при різних кутах компенсації θ_0 та різних їх ширинях β на рівні 0,707

В результаті цієї суперпозиції отримуємо в площинах, нормальних до поздовжньої осі ГПБА, джерело з характеристикою спрямованості у вигляді кардіоїди (рис. 2). Її максимум маємо у напрямі, нормальному до поздовжньої осі ГПБА ($\theta = 0^\circ$), а нульове значення – у протилежному ($\theta = \pi$).



Р и с . 2. Нормована характеристика спрямованості системи тіл «морська поверхня – елемент ГПБА» в площинах, нормальних до морської поверхні та поздовжньої осі ГПБА

В якості кількісної характеристики ефективності ГАС з ГПБА визначимо її коефіцієнт концентрації. Зауважимо, що в існуючій літературі [5, 6] коефіцієнт концентрації має два визначення – осьовий коефіцієнт концентрації K і коефіцієнт концентрації $K(\theta)$ в деякому довільно визначеному напрямку θ . Зв'язок між ними встановлюється виразом

$$K(\theta) = KR^2(\theta),$$

де $R(\theta)$ – характеристика спрямованості, нормована в напрямі θ . Осьовий коефіцієнт концентрації K може змінюватися від 1 до ∞ . В той же час коефіцієнт концентрації в заданому напрямі θ залежить від характеристики спрямованості $R(\theta)$ і може бути меншим 1. Саме остання залежність і є причиною того, що ефективність ГАС з ГПБА при їх експлуатації в умовах наявності впливу морської поверхні суттєво відрізняється від ефективності ГАС з ГПБА при відсутності в морі обмежуючих границь. Наведені висновки демонструють криві на рис. 3.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як показано в роботах [1, 7, 8], звукове поле Φ ГПБА, розміщеної біля морської поверхні розподілу «повітря – вода», визначається двома складовими – $\Phi^{(1)}$ та $\Phi^{(2)}$.

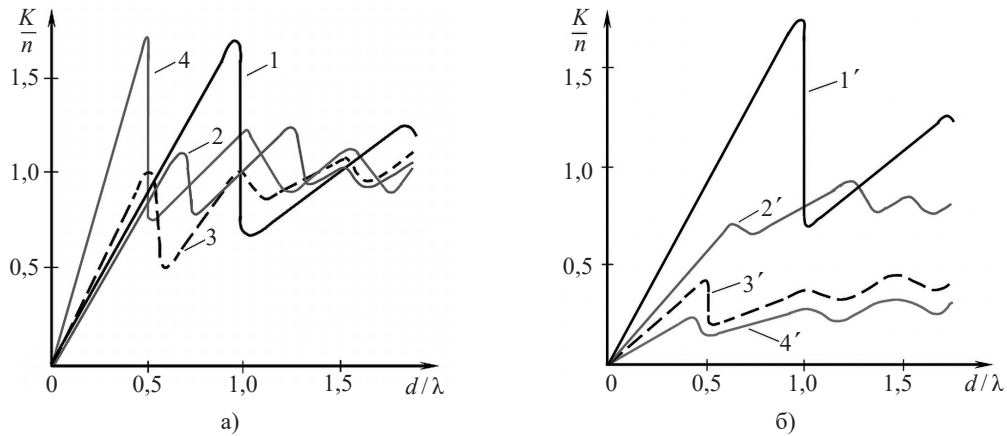


Рис. 3. Залежність відношення коефіцієнта концентрації ГАС з ГПБА ($n = 10$) до числа її елементів від d/λ при відсутності морських границь обмежень (а) і при наявності морської границі розподілу «повітря – вода» (б). Криві (1 – 4; 1' – 4') відповідають кутам компенсації ГПБА $\theta_k = 0^\circ; 30^\circ; 60^\circ; 90^\circ$

Перша з них $\Phi^{(1)}$ характеризує так звану «дипольну» складову впливу морської поверхні на ГПБА. Друга складова $\Phi^{(2)}$ описує звукове поле ГПБА в морі без наявності границь обмежень і відповідає умовам формування полів монополю. Суперпозиція полів диполя і монополя при малих відстанях між джерелами їх формування, що має місце в області інфразвукових і низьких звукових робочих частотах ГАС з ГПБА, дозволяє отримати джерело звуку з характеристикою спрямованості у вигляді кардіоїди. Саме формування системою тіл «морська поверхня – ГПБА» кардіоїдної характеристики спрямованості в площинах, нормальних до морської поверхні та поздовжньої осі ГПБА, і є фізичною причиною зміни ефективності ГАС з ГПБА в присутності морської поверхні порівняно з її ефективністю при експлуатації в безмежному морському просторі.

Проаналізуємо тепер ефективність застосування ГАС з ГПБА в реальних умовах їх експлуатації. При буксируванні ГАС з ГПБА, у якій відсутня компенсація і характеристика спрямованості якої має форму дископодібної, кардіоїдна характеристика системи тіл «морська поверхня – ГПБА» має максимум. Тому морська поверхня розподілу «повітря – вода» не впливає в цьому випадку на ефективність ГАС з ГПБА. Проблеми з ефективністю дії ГАС з ГПБА починаються при введенні в елементи ГПБА компенсаційних затримок. Вони пов'язані з формою характеристики спрямованості елемента ГПБА. При малих кутах компенсації (до $\theta_0 = 30^\circ$) кардіоїда мало змінює характеристики спрямованості ГПБА. При подальшому збільшенні θ_0 викривлення спрямованості ГПБА збільшується і досягає максимуму (порядка 0,5) для випадку перетворення характеристики спрямованості в однонаправлену. Якщо при цьому врахувати, що при збільшенні кута θ_0 компенсації ГПБА ширина її характеристики спрямованості збільшується, то це обумовлює відповідне зменшення коефіцієнту концентрації ГПБА, тобто ефективності дії ГАС з ГПБА.

Дійсно, у випадку, коли кут θ_0 компенсації антени дорівнює $\theta_0 = 0$, ширина характеристики спрямованості її $\theta_{0,7}$ визначається виразом $\theta_{0,7} = 50^\circ \frac{\lambda}{l}$, де λ – довжина робочої звукової хвилі, а l – довжина активної частини ГПБА. У випадку $\theta_0 = 90^\circ$, ця ширина збільшується і

становить $\theta_{0,7} = 108 \sqrt{\frac{\lambda}{l}}$. Як вже вказувалось, звичайно ефективність дії ГПБА у складі ГАС визначається її коефіцієнтом концентрації K .

На рис. 3 наведені криві, які описують коефіцієнти концентрації ГПБА для двох випадків. Перший з них (а) відповідає випадку, коли антена не обмежена ніякими границями розподілу поверхонь. Другий випадок (б) (криві позначені штрихом) характерний для ГПБА, які буксируються в зоні впливу морської поверхні розподілу «повітря – вода». Зауважимо, що згідно з кардіоїдною характеристикою спрямованості (рис. 2) перетворювача ГПБА, яка знаходиться в зоні впливу морської поверхні «повітря – вода», в товщі морської води між поверхнею розподілу «повітря – вода» і горизонтом буксирування ГПБА, її коефіцієнт концентрації близький або дорівнює нулю.

Обговоримо отримані розрахункові дані. Аналіз кривих на рис. 3 свідчить про те, що при буксируванні ГПБА в товщі морської води при відсутності будь-яких поверхонь розподілу типу морська поверхня або морське дно мають місце наступні результати по ефективності застосування ГАС з ГПБА. По-перше, коефіцієнт концентрації ГПБА визначається напрямом компенсації θ_0 антени, відстанню d між її перетворювачами і значенням робочої довжини хвилі λ антени. По-друге, для вибраного кута θ_0 компенсації ГПБА, її коефіцієнт концентрації однаковий для цього кута θ_0 при будь-якому куті θ її характеристики спрямованості. По-третє, із збільшенням кута компенсації θ_0 , крім кута $\theta_0 = 90^\circ$, коефіцієнт концентрації значно зменшується порівняно з $\theta_0 = 0^\circ$.

Зовсім інша ситуація має місце при врахуванні реальних умов експлуатації ГАС з ГПБА, зокрема при наявності морської поверхні розподілу «повітря – вода» (рис. 3б). По-перше, ефективність застосування ГАС з ГПБА різко відрізняється при розміщенні ГПБА до глибини H . При експлуатації ГПБА в шарі води товщиною H між морською поверхнею і горизонтом розміщення ГПБА ефективність застосування ГПБА близька до нуля. Це обумовлено низьким значенням кардіоїди в цьому шарі, характерно для всіх напрямків компенсації θ_0 ГПБА і означає, що використання ГАС з ГПБА

в цьому випадку не має сенсу, оскільки не дозволить визначити координати цілі ні в товщі H морської води, ні на морській поверхні.

Зовсім інша картина має місце при розміщенні ГПБА на глибині занурення нижче H (рис. 3а). В напрямі, перпендикулярному до поздовжньої осі ГПБА, коли напрям θ_0 компенсації антени $\theta_0 = 0^\circ$, її коефіцієнт концентрації такий самий, як і при експлуатації ГПБА в морі без наявності в ньому будь-яких поверхонь розподілу. Це обумовлено тим, що при $\theta_0 = 0^\circ$ кардіоїдна характеристика спрямованості перетворювачів ГПБА дорівнює $R_n = 1$. При інших напрямках компенсації θ_0 ефективність ГАС з ГПБА значно зменшується, прямуючи до нуля при досягненні горизонту заглиблення ГПБА, рівному H . Це підтверджується аналізом кривих рис. 3б, згідно з яким при збільшенні кута компенсації ГПБА θ_0 від 30° до 90° коефіцієнт її концентрації суттєво зменшується. Це зменшення обумовлене характером поведінки кардіоїдної характеристики спрямованості перетворювачів ГПБА в площинах, нормальних до поздовжньої осі ГПБА. Таким чином, при експлуатації ГАС з ГПБА в умовах наявності морської поверхні і глибини занурення ГАС на відстані, більшій від цієї глибини, ефективність використання ГАС з ГПБА для виявлення підводних цілей, наприклад, підводних човнів, також суттєво зменшується.

ВИСНОВКИ

З точки зору практичного застосування ГАС з ГПБА необхідно звернути увагу на три наступні фактори. По-перше, вони призначені для роботи в інфразвуковому та низькому звуковому діапазонах частот. По-друге, для забезпечення висвітлення підводної обстановки в будь-якій зоні Світового океану вони повинні формувати віяло характеристик спрямованості в діапазоні кутів від 0° до 180° . По-третє, при визначенні ефективності застосування ГАС з ГПБА виходимо з того, що будь-який морський простір не має обмежувачих границь. Але при роботі в області інфразвукових і низьких звукових частот цей морський простір завжди обмежений в хвильовому відношенні морською поверхнею або морським дном. Тому виникає необхідність визначити ефективність ГАС з ГПБА при наявності хоча б одного з цих обмежень.

Виконані дослідження ефективності застосування ГАС з ГПБА при наявності впливу на неї обмежувачої морської поверхні. Показано, що в діапазоні інфразвукових і низьких звукових частот морська поверхня характеризується властивостями диполя, характеристика спрямованості якого нормальна до плоскої морської поверхні. В той же час ГПБА можливо охарактеризувати як таку, гідроакустичні перетворювачі якої володіють властивостями монополя. Оскільки в діапазоні частот роботи ГПБА в системі тіл «морська поверхня – ГПБА» диполь і монополь майже співпадають, то сформована ними характеристика спрямованості має вигляд кардіоїди. Оскільки кардіоїда формується в площинах, нормальних до морської поверхні та поздовжньої осі ГПБА, то вона суттєво змінює ефективність ГАС з ГПБА. До глибин занурення ГПБА вона повністю нівелює можливість ГАС з ГПБА встановлювати наявність цілей. Після глибини занурення ГПБА ефективність ГАС зменшується і суттєво залежить від кута компенсації ГПБА.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дерєпа А.В., Лейко А.Г., Меленко Ю.Я. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 7. Комплексная система «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Проблемные аспекты системы «гидроакустическая станция – надводный корабль» с антеннами, размещенными в корпусе корабля: монография. Киев: Изд. дом Д. Бурого. 2014. 424 с.
2. Бабаев А.Э. Нестационарные волны в сплошных средах с системой отражающих поверхностей: монография. Киев: Наукова думка. 1990. 176 с.
3. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Монография. Л.: Гидрометеоздат. 1982. 346 с.
4. Клей К., Медвин У. Акустическая океанография: основы и применение: монография. М.: Мир. 1988. 580 с.
5. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн: монография. Л.: Судостроение. 1973. 280 с.
6. Дідковський В.С., Порошин С.М., Коржик В.О. та ін. Акустичні антени: монографія. Київ: ФОП Амелянчик. 2014. 247 с.
7. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики: монография. Київ: Наукова думка. 2007. 640 с.
8. Звукові поля гідроакустичних станцій з гнучкими протяжними буксируваними антенами в присутності морської поверхні / Лейко О.Г., Гамалій Н.В., Позднякова О.М., Аверічев І.В. Озброєння та військова техніка. 2026. № 1(49). С. 84—88. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1\(49\).84-88](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1(49).84-88).

REFERENCES

1. Derepa, A.V., Leiko, A.G. & Melenko, Yu.Ya. (2014). "Osnovy voenno-tekhnicheskikh issledovaniy. Teoria i prilozheniya. T. 7. Kompleksnaia sistema «gidroakusticheskoe vooruzhenie – nadvodnii korabl». Problemnii aspekti systemy «gidroakusticheskaia stantsiia – nadvodnii korabl» s antennami, razmeshchenymi v korpuse korablia" [Fundamentals of military-technical studies. Theory and applications. Vol. 7. Complex system «hydroacoustic weapon – surface ship». Problematic aspects of the «hydroacoustic station – surface ship» system with antennas placed in the hull of the ship]. K.: D. Buraho Publ. house. 424 p.
2. Babaev, A.E. (1990). "Nestatsionarnye volny v sploshnykh sredakh s sistemoi otrazhaiushchikh poverkhnostei" [Nonstationary waves in continuous media with a system of reflecting surfaces]. K.: Nauk. dumka. 176 p.
3. Brekhovskikh, L.M. & Lysanov, Yu.P. (1982). "Teoreticheskie osnovy akustiki okeana" [Theoretical foundations of ocean acoustics]. Monograph. L.: Hidrometeoizdat. 346 p.
4. Clay, K. & Medvin, U. (1988). "Akusticheskaia okeanografiia: osnovy i primenenie" [Acoustic oceanography: fundamentals and applications]. M.: Mir. 580 p.
5. Smaryshev, M.D. (1973). "Napravlennost gidroakusticheskikh antenn" [Directivity of hydroacoustic antennas]. L.: Sudostroenie. 280 p.
6. Didkovskiy, V.S., Poroshyn, S.M. & Korzyk, V.O. (2014). "Akustychni anteny" [Acoustic antennas]. K.: FOP Amelianchik. 247 p.

7. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsipura, V.T. (2007). "Osnovy akustiky: monografia" [Fundamentals of Acoustics: Monograph]. K.: Naukova Dumka. 640 p.
8. Leiko, O.G., Hamalii, N.V., Pozdniakova, O.M. & Averichev, I.V. (2026) "Zvukovi polia hidroakustychnykh stantsii z hnuchkymy protiazhnymy buksyruvanymy antenamy v prysutnosti morskoi poverkhni" [Sound fields of hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in the presence of the sea surface]. Weapons and Military Equipment. No. 1(49). Pp. 84—88. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1\(49\).84-88](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1(49).84-88).

Leiko O.G., Kocharian O.O., Pozdniakova O.M.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THE EFFICIENCY OF HYDROACOUSTIC STATIONS WITH FLEXIBLE EXTENDED HYDROACOUSTIC ANTENNAS WHEN USING THEM IN DEEP SEAS AND IN THE PRESENCE OF THE SEA SURFACE

It has been determined that the efficiency of using hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in deep seas and seas with the presence of limiting boundaries differs significantly from each other. The reasons for this difference have been established. They are related to the operation of hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in the infrasonic and low sound ranges of operating frequencies. It has been shown that in this frequency range the sea surface forms a directivity characteristic in the form of a dipole. At the same time, the directivity characteristic of the flexible extended towed antennas elements corresponds to the conditions for the formation of a monopole. The superposition of the sound fields of the dipole and monopole in the system of bodies «sea surface – flexible extended towed antennas» at small wave sizes of the flexible extended towed antennas depth is characterized by the formation of the directivity characteristic of the system of bodies in the form of a cardioid. It has been shown that it is this directivity characteristic that significantly changes the efficiency of using hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in the zone of influence of the sea surface. For depths less than the depth of immersion of the flexible extended towed antennas, the hydroacoustic stations with the flexible extended towed antennas completely loses the ability to illuminate the state of the underwater environment on the sea surface and in the seabed to the depth of immersion of the flexible extended towed antennas. For sea depths greater than the depth of immersion of the flexible extended towed antennas, the effectiveness of the use of the hydroacoustic stations with the flexible extended towed antennas significantly depends on the direction of inclination of the main lobe of the flexible extended towed antennas directivity characteristic to its longitudinal axis and decreases with its increase.

Keywords: flexible extended antenna, sea surface, station efficiency, concentration coefficient.

Відомості про авторів:

Лейко Олександр Григорович

доктор технічних наук, професор
професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
<https://orsid.org/0000-0002-5588-6449>
e-mail: Alexander_leiko@ukr.net

Кочарян Оксана Олександрівна

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9363-9270>
e-mail: andkochoks567@gmail.com

Позднякова Ольга Миколаївна

кандидат технічних наук
докторант
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>
e-mail: olpozdnjakova@gmail.com

Information about the authors:

Leiko Oleksandr

Doctor of Technical Sciences, Professor
Professor of the Chair
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5588-6449>
e-mail: Alexander_leiko@ukr.net

Kocharian Oksana

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3164-0129>
e-mail: andkochoks567@gmail.com

Pozdniakova Olha

Candidate of Technical Sciences
Doctoral Student
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>
e-mail: olpozdnjakova@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 01.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

УДК 617.751

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).116-124](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).116-124)

В. В. ПЕТРОВ, академік НАН України
доктор технічних наук, професор
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>

Є. Є. АНТОНОВ, доктор технічних наук
старший науковий співробітник
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>

В. М. ЗЕНІН, науковий співробітник
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>

В. Є. МІЛЕВСЬКИЙ
провідний інженер-конструктор
<https://orcid.org/0009-0006-4706-8143>
(Інститут проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України,
м. Київ)

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ПЛОСКО-ФОКУСУВАЛЬНОЇ ОПТИКИ

Розроблено алгоритм розрахунків спеціалізованої плоско-фокусувальної оптики зі зменшеними світловими діаметрами, яка призначена для збільшення приймальної площі фотодетектора при збереженні кутів огляду для використання в автоматизованих системах стеження за рухомими об'єктами. Виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів такої оптики. На основі розрахунків методом алмазного лезового мікроточіння сформовано тестові зразки зазначених лінз нової серії. Методом лазерної діагностики досліджено оптичні параметри створених лінз. Отримані результати дозволили оптимізувати параметри трансформуючої оптики і створити плоско-фокусувальні лінзи, найбільш придатні для практичного використання в системах стеження.

Ключові слова: геометричні параметри лінз, кільцеві фокусуєчі структури, лазерна діагностика мікропризмової оптики.

ВСТУП

Для ряду застосувань, зокрема в реальних системах з чотириплощинними фотодетекторами для автоматичного стеження за рухомими об'єктами, необхідні лінзи зі світловим діаметром, зменшеним до значення $D_S = 21$ мм. Такі так звані плоско-фокусувальні лінзи мають формувати в фокальній площині гомогенну світлову пляму. В Інституті проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України розроблено алгоритм моделювання і виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів, створено технологію формування та виготовлення

серію таких лінз Френеля [1–3]. Розглянемо деякі оптичні характеристики реально створених спеціалізованих плоско-фокусувальних кільцевих лінз нової серії.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІНЗ ФРЕНЕЛЯ

Методику розрахунку параметрів плоско-фокусувальної оптики детально викладено в декількох попередніх наших публікаціях, зокрема в роботі [4]. Перш за все, визначається радіус r_V гомогенної світлової плями в фокусі лінзи і визначається схема оптимізації фокусування випромінювання [4] для формування зображення. Відповідно, на поверхні лінзи формується центральна зона без рельєфу радіусом $R_0 = r_V$. В центрі фокального зображення моделюється не освітлена область радіусом r_j ($j = 0, 1, \dots, N$), яка створюється для усунення небажаного центрального максимуму інтенсивності. Зазвичай, величина «темної» області r_0 становить 0,2–0,4 мм. Вважається [4], що зазначена «темна» область для реально виготовлених лінз заповнюється пройденим світлом, який розсіяний на дефектах мікрорельєфу лінзи.

Для можливості застосування при виготовленні мікропризмової оптики методу алмазного мікроточіння [5–6] можна створювати призмові зони лінзи ΔR_k з декількох окремих складових мікропризм шириною ΔR_{kc} , ідентичних за глибиною рельєфу h_k та кутом рефракції α_k , тобто $\Delta R_k = \Sigma \Delta R_{kc}$. Величина ΔR_{kc} не може перевищувати значення 1,2–1,5 мм [4, 7], яке відповідає розмірам ріжучої кромки наявного алмазного інструменту, застосованого для формування мікрорельєфу.

Зазвичай, згідно з технічним завданням потенційного замовника, плоско-фокусувальні лінзи для систем стеження за рухомими об'єктами проєктувалися з робочим діаметром $D_L = 52$ мм при світловому діаметрі $D_S = 50$ мм для робочої довжини хвилі $\lambda = 1,064$ мкм. В останній час виявилось необхідним створити аналогічні лінзи нової серії зі зменшеним діаметром $D_L = 23$ мм при світловому діаметрі лінзи $D_S = 21$ мм. Фокальна відстань задана незмінною і становить $f = 17$ мм.

Основним призначенням нової оптики є її використання в оптичних блоках систем стеження, для яких основним завданням є встановлення самого факту присутності в повітрі рухомих об'єктів. Поставлена задача зберегти кутовий діапазон огляду при половинній чутливості фотоприймача, яка при повній апертурі дорівнює ± 30 град., при цьому збільшити приймальну площу, як мінімум в 2 рази, щоб отримати максимальний світловий потік, відбитий від об'єкту або прийнятий від джерела, таким чином забезпечивши підсилення сигналу в діапазоні кутів ± 15 град.

Для вирішення поставленої задачі планувалось використати лінзи нової серії в комплексі зі стандартним фотодетектором типу Hamamatsu S6801/S6968, який обладнаний апланатичною сферичною лінзою діаметром $d_D = 14$ мм. Чутлива поверхня детектора розміром $6,0 \times 6,0$ мм² розміщується на відстані 4,5 мм від центру напівсфери вбудованої лінзи. Загальний вигляд детектора Hamamatsu S6968 для видимого спектрального діапазону і Hamamatsu S6968-01 для інфрачервоного діапазону ілюструє рис. 1-а, спектральна характеристика детекторів наведена на рис. 1-б, а схема детекторного

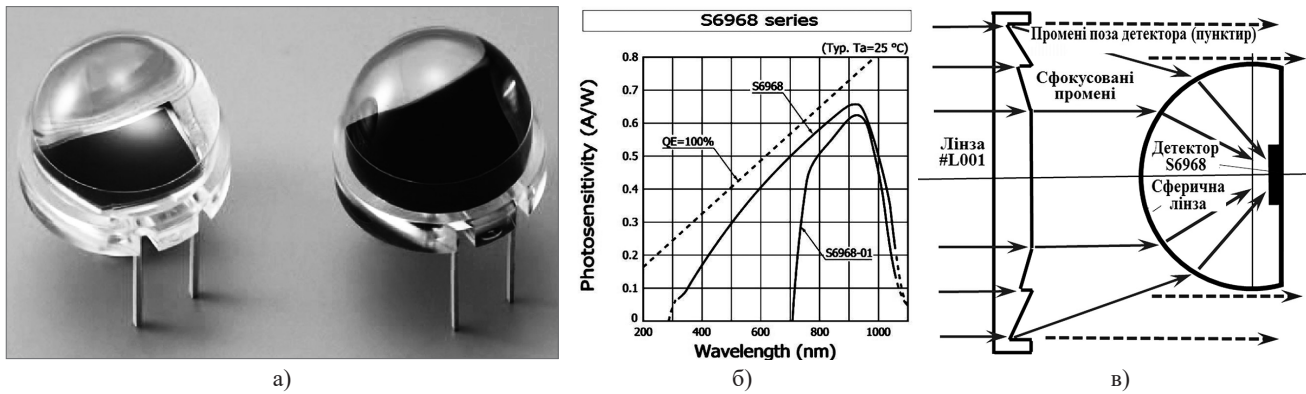


Рис. 1. Загальний вигляд детектора Hamamatsu S6968 і S6968-01 (а), спектральна характеристика детектора S6968 (б); схема детекторного блоку з лінзою ПІРІ НАН України (в)

блоку з додатковою лінзою ПІРІ НАН України зображена на рис. 1-в. Лінзи нової серії мають фокусувати на поверхні чутливої поверхні детектора периферійну частину світлового потоку діаметром $d_s = 21$ мм, що проходить поза сферичної лінзи діаметром $d_D = 14$ мм (зона штрихових ліній на рис. 1-в), не торкаючись центральної частини потоку, яка реєструється саме лінзою фотодетектора.

Особливістю розрахунку параметрів лінз нової серії, окрім зменшення кількості призматичних зон, виявилось збільшення величини α_k заломлюючих кутів мікропризм для центральних призматичних зон. Робоча довжина хвилі відповідно до спектральної характеристики детектора S6968-01 зменшена до значення $\lambda = 0,905$ мкм, відповідний коефіцієнт заломлення $n_1 = 1,5672$ згідно даним авторів [8].

Для сферичної лінзи радіусом $R_L = 7,0$ мм падаючий світловий потік з радіусами, більшими за $\sim 6,5$ мм, практично повністю відбивається від поверхні сфери. Так, на рис. 2 наведено характеристики відбиття потоку світла від поверхні такої сфери для різних відстаней L_R від осі сфери, розраховані за формулами Френеля [9]. Тому внаслідок значних втрат пройденого світлового потоку периферійними зонами сфери, доцільно створювати лінзи з плоскою центральною зоною без рельєфу з радіусами $R_0 = r_V$, меншими за 5–6 мм. Потік від цієї центральної зони практично без втрат буде фокусуватися на детекторі самою сферою, а частина потоку світла поза цією плоскою зоною фокусуватиметься додатковою лінзою.

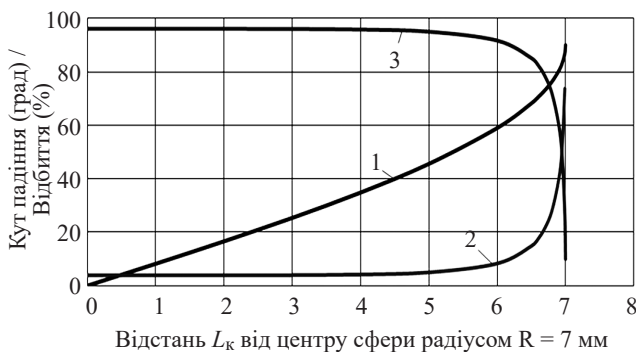


Рис. 2. Відбиття світла від поверхні сфери радіусом $R_L = 7,0$ мм: 1 – кут відбиття (град), 2 – коефіцієнт відбиття (%); 3 – коефіцієнт пропускання (%)

Приклад розрахунків геометричних параметрів першої з таких лінз #L001 нової серії, для якої радіус гомогенної світлової плями $r_V = 4,5$ мм, наведено на рис. 3. Центральна зона лінзи без мікрорельєфу, відповідно, має радіус $R_0 = r_V = 4,5$ мм.

Лінза #L001 має всього дві призматичні зони, кожна з яких складається з 6 та 4 складових мікропризм, відповідно, тобто створена шляхом формування 10 канавок мікрорельєфу з двома кутами заломлення мікропризм $\alpha_k = 21,093$ і $28,066$ град., має дві глибини рельєфу $h_k = 257,15$ і $267,96$ мкм. Схема фокусування цієї лінзи #L001, в якій враховано частину пройденого потоку від плоскої центральної частини лінзи без рельєфу з радіусом $R_0 = 4,5$ мм, наведена на рис. 4а. Профіль рельєфу ілюструється на рис. 4б. Світлопропускання цієї лінзи виявилось досить задовільним і становить $\tau_s \sim 80,9$ % при світловому діаметрі $D_s = 21$ мм.

Методом алмазного мікроточіння [5–7] згідно з результатами розрахунків виготовлено нову серію тестових лінз #L001-005 з полікарбонату. Лінзи відрізняються розміром центральної плоскої зони R_0 , в якій відсутній мікрорельєф. Окрім лінз з оптимальним розміром $R_0 = 4,5$ мм (лінзи #L001-002), створено лінзи з радіусом $R_0 = 6,5$ мм (#L003), $7,0$ мм (#L004) і $9,0$ мм (#L005). Головною метою такого варіювання величини R_0 є визначення оптимальної конструкції лінзи для отримання максимального сигналу на фотодетекторі при повороті лінзи відносно пройденого потоку на фіксовані кути $\varphi = 5; 10; 15; 20; 25$ і 30 град. Схеми фокусування для лінз #L002-005 наведено на рис. 5.

Реальні розраховані радіуси світлової плями r_V для лінз #L003-005 звужені відносно заданого розміру фокального зображення. Цей ефект пов'язаний з малою шириною призматичної зони ΔR_k лінзи порівняно з центральною зоною радіусом R_0 без рельєфу, яка саме і задає розмір освітленої площини в фокусі лінзи. Тому радіус світлової плями r_V для створених плоско-фокусувальних лінз #L003-005 з урахуванням радіуса темної зони $r_0 = 0,5$ мм становить лише 4,0; 3,5 і 2,75 мм, порівняно з заданими значеннями $r_V = 6,5; 7,0$ і $9,0$ мм, відповідно. Вважалось, що факт звуження фокальної світлової плями сприяє фокусуванню пройденого потоку в центр фотодетектора. Внесок центральної зони без рельєфу для лінз #L002-005 в освітленість світлової плями в фокусі становить, відповідно, 18; 38; 44 і 64 %,

Розрахунок лінзи # L001																		
Розрахунок Плоско-фокус. лінзи Френеля БЦ (корекція окремих зон): $r_0 = 0,5(1)-2,5(1)$ мм																		
$h = 257-268$ мкм, $f = 17$ мм, для $\lambda = 0,905$ мкм ($n_1 = 1,5672$), $r_V = 4,5$ мм, товщина $b = 3,0$ мм, $\text{гран.кут} = 39,648^\circ$, $\tau_s = 0,9612$																		
n	N	r_0/R_k	R_k	$\gamma_s = \arctan(r_1/f)$	$\alpha = \arctan(\sin(\gamma_s/(1,564 - \cos \gamma_s)))$	α	$\Delta R_k = b + r_1 \sin \alpha$	$\beta = 90 - \alpha$	h	$\gamma - \alpha$	$\tau(f)$	$\tau(f)$	$\pi(r_1^2 - r_2^2)$	$\pi(r_1^2 - r_2^2) \tau(f)$	Проп. суми зон	$\pi(r_1^2 - r_2^2) \tau(f)$	Проп. зони	Зміщ. краю R_k
			$r_1 = 4,5$ мм	рад	град	рад	мм		мкм	град	x100	мм ²	мм ²	%	мм ²	%	мкм	
0	#00	4.500000	0.000100 4.500000	0.000005 0.231091	0.00 13.24	0.000009 0.368144	0.001 21.093		0	34.33	0.906	90.554	63.6173	57.6081	90.554 %	57.6081	16.63	
1	#01	$r_0=0.5$	5.166667	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	20.2458	18.2660	90.430 %	60.51
2			5.833334	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	23.0384	20.7855	# 1	60.51
3			6.500000	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	25.8309	23.3049		60.51
4			7.166667	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	28.6234	25.8244		60.51
5			7.833334	0.231091	13.24	0.368144	21.093	21.093	0.66667	68.907	257.153	34.33	0.902	90.221	31.4159	28.3438		60.51
6			8.500000	0.339293	19.44	0.489843	28.066	21.093	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.902	90.221	34.2085	30.8633		60.51
7	#02	$r_0=2.5$	9.000001	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	27.4889	24.5053	89.940 %	94.58
8			9.500001	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	29.0597	25.9056	# 2	94.58
9			10.000001	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	30.6305	27.3059		94.58
10			10.500000	0.339293	19.44	0.489843	28.066	28.066	0.50000	61.934	267.967	47.51	0.891	89.146	32.2013	28.7062		94.58

Рис. 3. Фрагмент розрахунків параметрів лінзи #L001

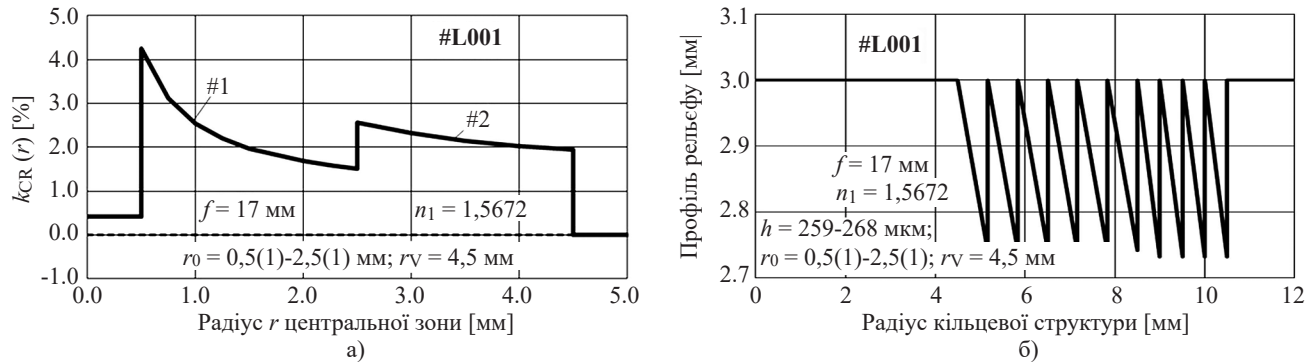


Рис. 4. Схема фокусування (а) і профіль мікрорельєфу (б) лінзи #L001

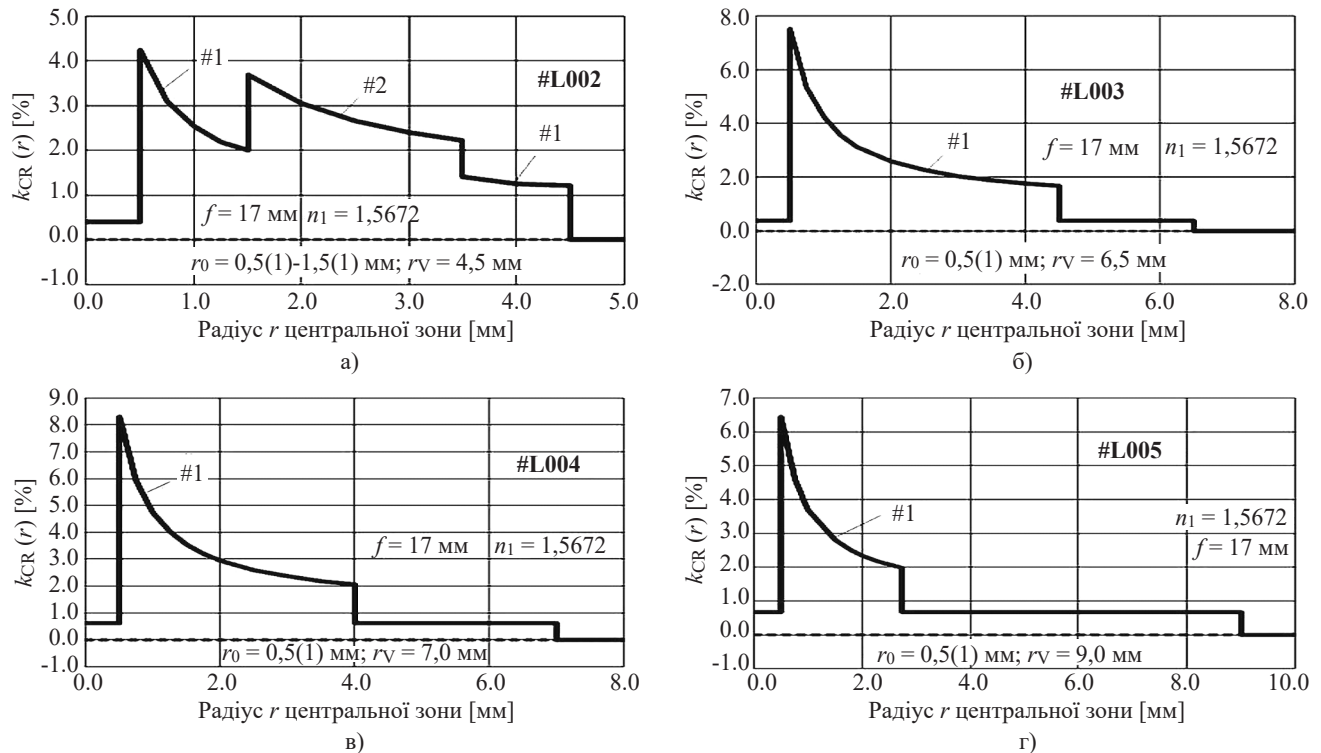


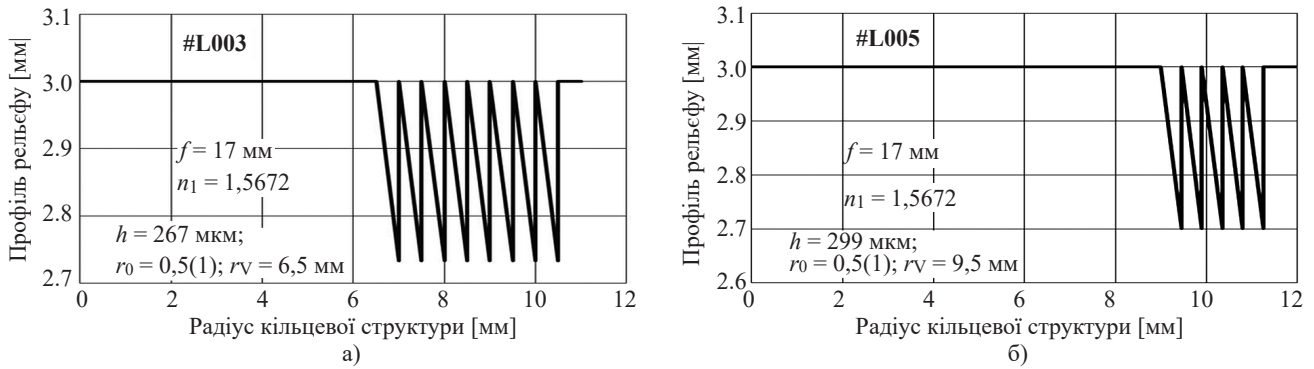
Рис. 5. Схеми фокусування: а) – лінза #L002; б) – #L003; в) – #L004; г) – #L005

що враховано при визначенні освітлення фокальної світлової плями від потоку через плоску центральну зону лінзи без рельєфу радіусом R_0 .

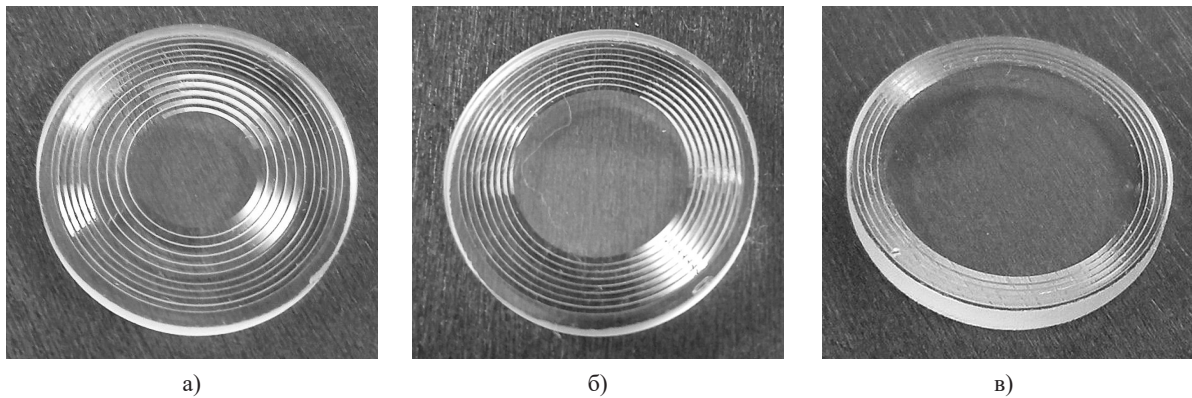
Профілі рельєфу деяких зі створених лінз з відносно великими радіусами плоских центральних зон $R_0 = r_V = 6,5$ і $9,0$ мм наведено на рис. 6. Зазначені лінзи #L003 і #L005 створені для дослідження процесу фокусування світла при кутах повороту потоку $\varphi > 15-20$ град.

Загальний вигляд деяких реально виготовлених лінз ілюструє рис. 7.

З метою розробки алгоритму формування оптики з підвищеним повним світлопропусканням τ_s було також створено лінзу #L006 світловим діаметром $D_S = 35$ мм з двома фокусами. Перші три мікропризмові зони цієї лінзи #1-3 мають заданий фокус $f = 17$ мм, а для двох останніх зон #4-5 фокальна відстань становить



Р и с . 6. Профілі рельєфу: а) – лінза #L003; б) – #L005



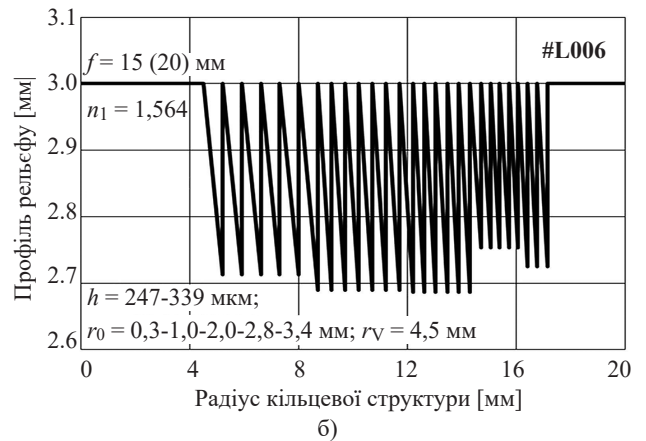
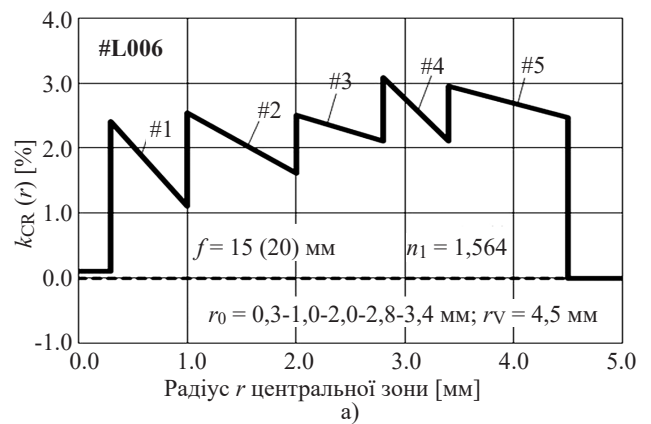
Р и с . 7. Загальний вигляд деяких лінз нової серії: а) – лінза #L002; б) – лінза #L003; в) – лінза #L005

$f = 20$ мм, що зменшує кути заломлення мікропризм і тим самим підвищує світлопропускання відповідних призматичних зон. Лінза розрахована для довжини хвилі $\lambda = 1,064$ мкм, радіус центральної плоскої зони лінзи становить $R_0 = 4,5$ мм. Графік залежності світлопропускання τ_S лінзи #L006 від радіуса лінзи R_k наведено на рис. 8.

Дійсно, значення τ_S для двофокусної лінзи збільшується до $\sim 84\%$, порівняно з величиною $\tau_S \sim 80\%$ для однофокусної лінзи з фокусом $f = 17$ мм при повному світловому діаметрі $D_S = 35$ мм. Для значення $D_S = 22$ мм (зони #1–2) світлопропускання становить $\tau_S \sim 88\%$ внаслідок відносно невеликих кутів заломлення мікропризм α_k для цих двох центральних зон. Схема фокусування світла для цієї лінзи наведена на рис. 9а, профіль рельєфу ілюструється рис. 9б.



Р и с . 8. Світлопропускання лінзи #L006



Р и с . 9. Схема фокусування (а) і профіль мікрорельєфу (б) лінзи #L006

Фрагмент розрахунків параметрів рельєфу лінзи #L006 наведено на рис. 10.

Розрахунок лінзи # L 006																			
Розрахунок плоско-фокусувальної лінзи Френеля БЦ (корекція окремих зон): $r_0 = 0.5(1)-1.5(1)$ mm																			
$h = 247-339$ mkm, $f = 15$ (20) mm, для $\lambda = 1,064$ мкм ($n_1 = 1,564$), $r_1 = 4,5$ mm, товщина $B = 3,0$ mm, гранкут = $39,649^\circ$, $t_2 = 0,9512$																			
n	N	r_0/R_k	R_k	$\gamma_i = \arctg(r_i/f)$	$\alpha = \arctg(\sin \gamma_i / (1,564 - \cos \gamma_i))$	α	$\Delta R_k = h \cdot \arctg \alpha_{ок}$	$\beta = 90 - \alpha$	h	$\gamma + \alpha$	$t(fr)$	$t(fr)$	$\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)$	$\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot t(fr)$	Проп. # 1-N %	$\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \cdot t(fr)$ mm ²	Проп. зони %	Смещ. края R_k мкм	
		$r_1 = 4,5$ mm	рад	град	рад	град	мм		мкм	град		x100	мм ²	мм ²	суми зон	мм ²	зони		
0	#00	4.500000	0.000000	0.00	0.000000	0.000	0.000	0.70000	0	39.80	0.906	90.554	63.6173	57.6081	90.554 %	57.6081	5.99		
1	#01	$r_0 = 0.3$	5.200000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	21.3314	19.2150	90.206 %	156.8896	16.31	87.93
2			5.900000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	24.4102	21.9883				87.93
3			6.600000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	27.4889	24.7616				87.93
4			7.300000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	30.5677	27.5349				87.93
5			8.000000	0.273009	15.64	0.421696	24.161	0.70000	65.839	314.026	39.80	0.901	90.078	33.6465	30.3082				87.93
6		8.700000	8.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	314.026	61.28	0.901	90.078	36.7252	33.0815				87.93
7	#02	$r_0 = 1.0$	9.200000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	28.1173	24.1824	88.142 %	197.6474	20.54	173.81
8			9.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	29.6881	25.5334				173.81
9			10.200000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	31.2588	26.8844				173.81
10			10.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	32.8296	28.2353				173.81
11			11.200000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	34.4004	29.5863				173.81
12			11.700000	0.474257	27.17	0.595255	34.106	0.50000	55.894	338.597	61.28	0.860	86.006	35.9712	30.9373				173.81
13		12.200000	12.200000	0.597177	34.22	0.651703	37.340	0.41667	55.894	338.597	71.56	0.860	86.006	37.5420	32.2883				173.81
14	#03	$r_0 = 2.0$	12.616667	0.597177	34.22	0.651703	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	32.4849	25.2371	84.888 %	164.1344	17.06	216.15
15			13.033334	0.597177	34.22	0.651703	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	33.5758	26.0846				216.15
16			13.450000	0.597177	34.22	0.651703	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	34.6666	26.9320				216.15
17			13.866667	0.597177	34.22	0.651703	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	35.7574	27.7795				216.15
18			14.283334	0.597177	34.22	0.651703	37.340	0.41667	52.660	317.873	71.56	0.777	77.689	36.8483	28.6269				216.15
19		14.700000	14.700000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.777	77.689	37.9391	29.4744				216.15
20	#04	$r_0 = 2.8$	15.040000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	31.7665	25.8821	84.218 %	135.3284	14.07	146.81
21			15.380000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	32.4929	26.4739				146.81
22			15.720000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	33.2192	27.0657				146.81
23			16.060000	0.536735	30.75	0.627759	35.968	0.34000	54.032	246.734	66.72	0.815	81.476	33.9455	27.6575				146.81
24	#05	$r_0 = 3.6$	16.400000	0.576375	33.02	0.644225	36.911	0.36667	53.089	275.415	69.94	0.777	77.708	38.2053	29.6884	83.425 %	91.0345	9.46	179.02
25			17.133334	0.576375	33.02	0.644225	36.911	0.36667	53.089	275.415	69.94	0.777	77.708	39.0500	30.3448				179.02
26		17.500000	17.500000	0.576375	33.02	0.644225	36.911	0.36667	53.089	275.415	69.94	0.777	77.708	39.8947	31.0013				179.02

Р и с . 10. Фрагмент розрахунків параметрів лінзи #L006

При розрахунках геометричних параметрів цієї лінзи не враховувалось розширення призмових зон внаслідок звуження заломлених світлових потоків [4], оскільки кожна зі створених призмових зон #1–5 складається з декількох ідентичних складових мікропризм і зазначене звуження потоків не виникає.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ЛІНЗ

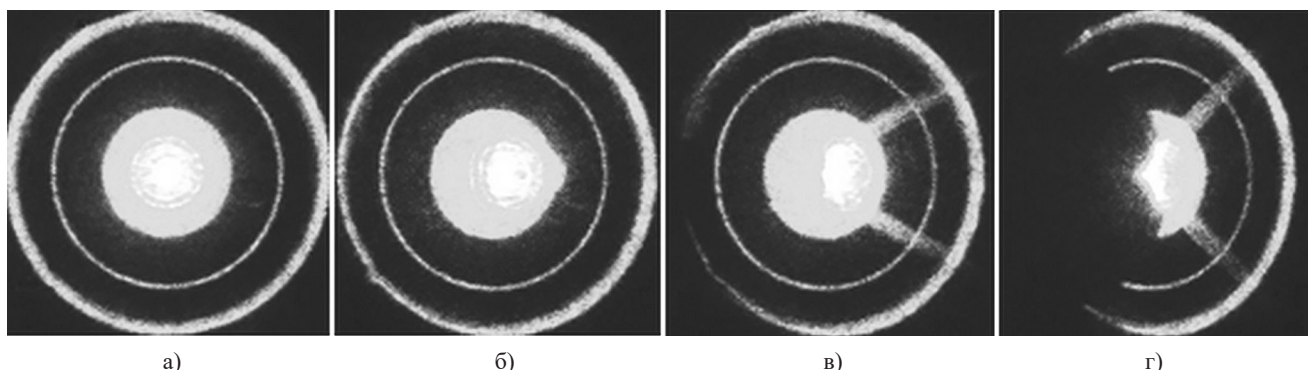
Для експериментального дослідження виготовлених зразків плоско-фокусувальних лінз модернізовано лазерний стенд [4], який дозволяє отримувати на матовому напівпрозорому екрані зображення паралельного пучка світла від лазера, пройденого через досліджувану лінзу. Пучок створюється трьохлінзовою конденсорною системою, «зелений» ніодимовий лазер з подвоєнням частоти має довжину хвилі $\lambda = 0,532$ мкм окрім променя з довжиною $\lambda = 1,064$ мкм для основної моди. Діаметр колімованого світлового потоку в площині екрану $D_s = 59$ мм. Для дослідження форми сигналу на екрані використовувалася фотореєстрація зображення камерою Canon-7000, кількісна реєстрація інтенсивностей можлива за допомогою фотодіоду типу ФД288А.

На рис. 11 наведено розподіл на екрані інтенсивності пройденого через лінзу #L002 паралельного колімованого лазерного променя при декількох кутах повороту лінзи в світловому потоці для номінальної відстані спостереження від екрану до рельєфу лінзи $L_s = 17$ мм. Дослідження проведено для видимого спектрального діапазону для $\lambda = 0,532$ мкм з метою візуалізації просторових змін розподілу.

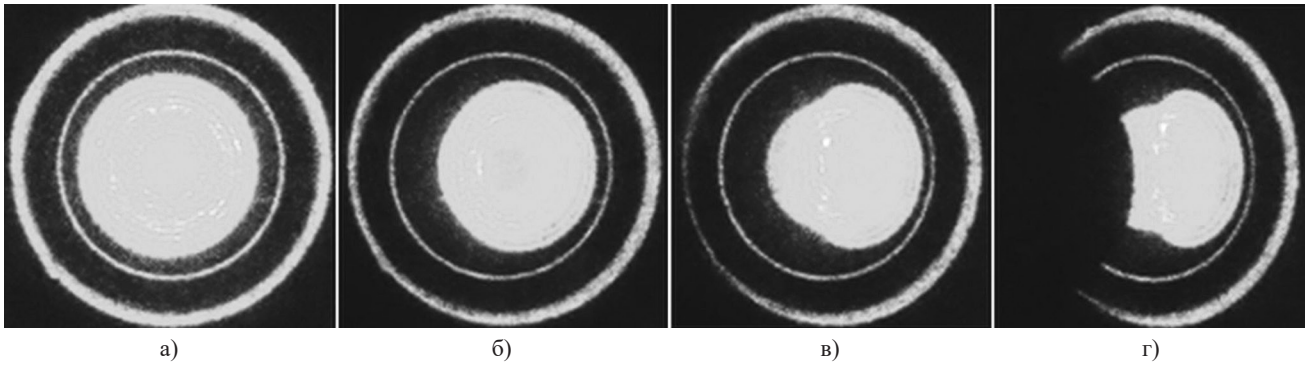
При зменшенні відстані спостереження до значення $L_s = 10$ мм (рис. 12) розподіл освітленості на екрані при повороті лінзи в потоці стає більш гомогенним і більш сконцентрованим в центральних зонах зображення, що важливо при кількісних дослідженнях енергетичних характеристик лінз.

З отриманих на лазерному стенді розподілів освітленості екрану при повороті лінз в потоці можна зробити висновок про доцільність зменшення відстані L_s при визначенні енергетичних характеристик фотодетектора з додатковою лінзою, оскільки в такому режимі зміщення зображення від центру є мінімальним.

Профілограми сфокусованого зображення на екрані для лінзи ##L002 для відстані спостереження $L_s = 10$ мм наведено на рис. 13. Для визначення про-



Р и с . 11. Зображення на екрані для лінзи #L002 ($f_0 = 17$ мм, $r_v = 4,5$ мм, $L_s = 17$ мм) для $\lambda = 0,532$ мкм: кут повороту $\varphi = 0$ град. (а); 10 град. (б); 20 град. (в); 30 град. (г)

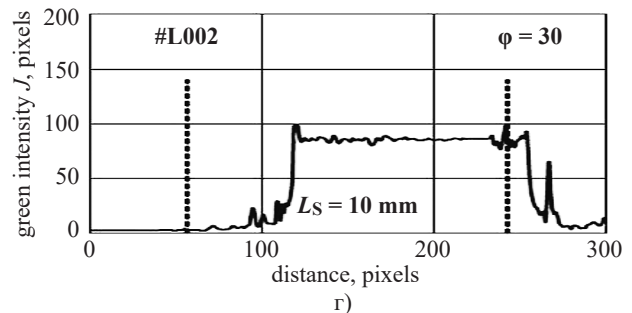
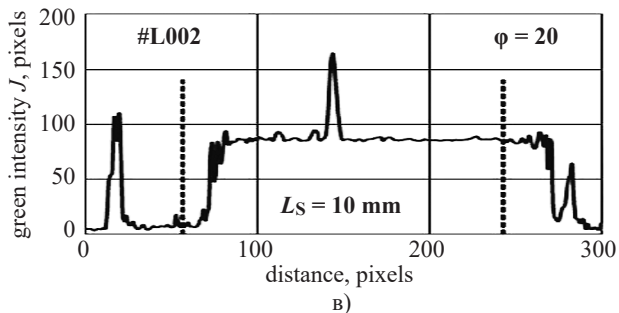
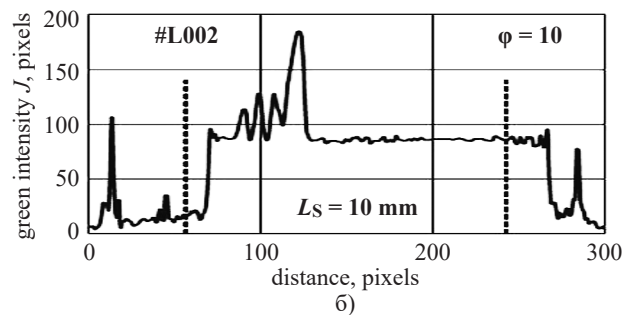
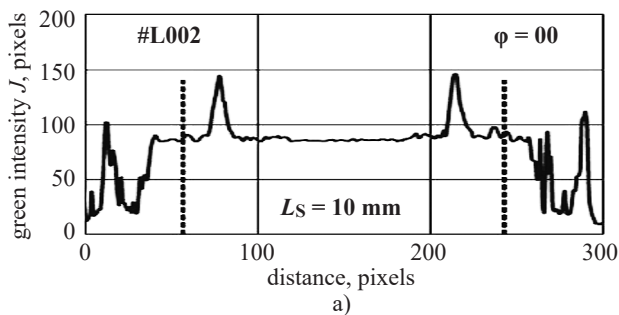


Р и с . 12. Зображення на екрані для лінзи #L002 ($f_0 = 17$ мм, $r_V = 4,5$ мм, $L_S = 10$ мм) для $\lambda = 0,532$ мкм: кут повороту $\varphi = 0$ град. (а); 10 град. (б); 20 град. (в); 30 град. (г)

філів інтенсивностей використовувалась програма *Image J 1.53* [10].

Для визначення фокусувальних властивостей детектора Hamamatsu S6968-01 при використанні додаткових лінз #L001-005, створено спеціальний оптичний стенд. Лінза жорстко фіксується на заданій відстані L_D від площини рельєфу до поверхні сфери детектора в картриджі, який повертається в світловому потоці на необ-

хідні кути $\varphi = 0-30$ град. навколо радіальної осі лінзи. Відстань L_D може змінюватися в діапазоні 1,0–25,0 мм для дослідження різних режимів фокусування проведеного потоку. Картридж з певною лінзою і детектором освітлюється колімованим паралельним світловим потоком від «зеленого» лазера, реєструється інтенсивність потоку на довжині $\lambda = 1,064$ мкм. Детектор S6968-01 в картриджі з лінзою #L002 зображено на рис. 14.



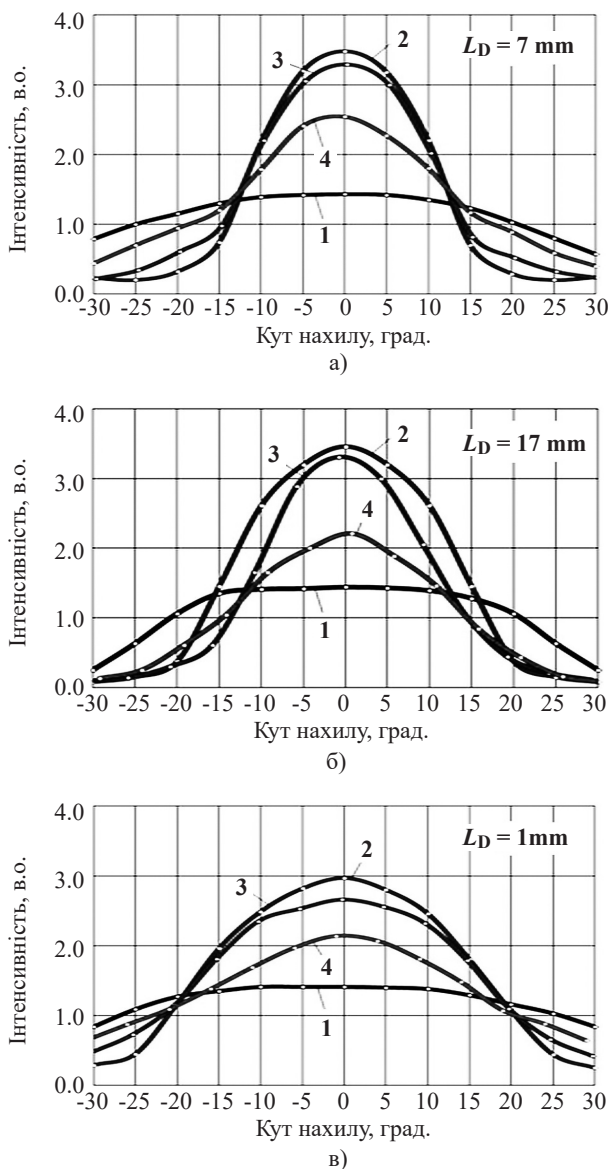
Р и с . 13. Профілограми плями для лінзи #L002 ($f_0 = 17$ мм, $r_V = 4,5$ мм; $L_S = 10$ мм): кут повороту $\varphi = 0$ град. (а); 10 град. (б); 20 град. (в); 30 град. (г)



Р и с . 14. Загальний вигляд детектора Hamamatsu S6968-01 в картриджі з лінзою #L002: а – картридж для $L_D = 1,0$ мм; б – картридж зі змінним фокусом $L_D = 7-25$ мм; в – картридж для $L_D = 10$ мм

Кількісні вимірювання інтенсивності світлового потоку на інфрачервоній довжині хвилі $\lambda = 1,064$ мкм, пройденого через сферичну лінзу детектора S6968-01, а також через лінзу детектора з додатковими лінзами #L002-005 при декількох кутах повороту картриджа в потоці, наведено на рис. 15. На першому етапі лінза з фокусом $f = 17$ мм розміщувалась в картриджі на відстані $L_D = 7$ мм (рис. 15а) від поверхні сфери радіусом $R_D = 7,0$ мм, тобто поверхня детектора Hamamatsu S6968-01 знаходилась практично в фокусі лінзи.

Використання додаткової лінзи радіусом $R_L = 10,5$ мм з площею $S_L = 346$ мм², яка \sim в 2,6 рази перевищує активну робочу площу детектора з радіусом $R_D = 6,5$ мм, призводить до збільшення зареєстрованого потоку приблизно до такого саме значення (2,54 рази) для нормального падіння променів. Для відстані спостереження $L_D = 7$ мм при повороті лінзи з детектором в потоці зареєстрований сигнал зменшується і при куті повороту



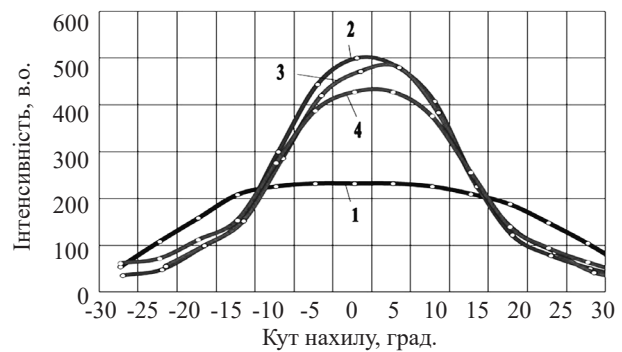
Р и с . 15. Інтенсивність пройденого потоку для $L_D = 7$ мм (а); $L_D = 17$ мм (б) і $L_D = 1$ мм (в): 1 – без лінзи; 2 – з лінзою #L002; 3 – з лінзою #L003; 4 – з лінзою #L005

$\varphi = 13-15$ град. лінза втрачає свою ефективність – сигнал без додаткової лінзи перевищує сигнал з лінзою.

При збільшенні відстані спостереження до значення $L_D = 17$ мм, при повороті картриджа всі зареєстровані інтенсивності знижуються (рис. 15б), зокрема через екранування світлового потоку боковими стінками картриджа. Додаткові лінзи збільшують зареєстрований світловий потік лише до кутів повороту $\varphi < 12-16$ град.

При зменшенні відстані спостереження до значення $L_D = 1,0$ мм при наявності додаткових лінз інтенсивність зареєстрованого сумарного заломленого потоку світла при всіх кутах повороту картриджа дещо зменшується (рис. 15в), однак потік з лінзами залишається більшим потоку без лінз до кутів повороту $\varphi \approx 18-20$ град.

Дослідження рефракції пройдених променів на спеціальному натурному стенді з інфрачервоним лазером з довжиною хвилі $\lambda = 0,905$ мкм для номінальної відстані спостереження, результати яких наведені на рис. 16, виявили ефект, аналогічний наведеному на рис. 15а. При кутах падіння променів $\varphi < 14-15$ град. додаткові лінзи призводять до помітного збільшення повного пройденого потоку світла, зібраного детектором S6968-01. Однак, при більших кутах падіння всі лінзи виявились не ефективними – зареєстрована інтенсивність потоку світла лише зменшується.



Р и с . 16. Рефракція променя для $\lambda = 0,905$ мкм на сфері $R = 7,0$ мм з деякими лінзами: 1 – без лінз; 2 – лінза #L002 ($r_V = 4,5$ мм); 3 – лінза #L003 ($r_V = 6,5$ мм); 4 – лінза #L004 ($r_V = 7,0$ мм)

Планувалось також провести дослідження при освітленні картриджа з детектором і лінзою за допомогою світлодіоду з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,68$ мкм. На жаль, наявні на даний час детектор S6968-01 і джерело освітлення з такою довжиною хвилі не дозволяють безпосередньо провести дослідження фокусуємих властивостей детектора Hamamatsu S6968-01 з додатковими лінзами, оскільки їх спектральні характеристики не співпадають. Такі практичні дослідження можливі після отримання іншого кремнієвого фотодетектора типу S6968 або S6801 з більш широкою спектральною характеристикою, що включає видиму частину спектру (рис. 16) або використання світлодіодного джерела освітлення для інфрачервоної зони спектру з довжиною хвилі $\lambda \sim 0,8-1,0$ мкм.

Таким чином, використання додаткових лінз в комплексі з детектором Hamamatsu S6968-01, обладнаного власною сферичною лінзою, в ряді режимів виявляється ефективним. При кутах повороту оптичного блоку

в світловому потоці на кути, менші за $\varphi < 18\text{--}20$ град. спостерігається збільшення зареєстрованого повного світлового потоку відносно потоку без лінз. Для нормального падіння променів збільшення потоку становить 2,0–2,6 рази, що на практиці значно підвищує надійність реєстрації сигналів, відбитих від спостережуваних об'єктів. Однак при більших кутах повороту блоку в потоці додаткові лінзи виявились неефективними – наявність лінз призводить лише до зменшення сигналу фотодетектора.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику розрахунків параметрів спеціалізованих плоско-фокусувальних лінз нової серії для систем автоматичного стеження за рухомими об'єктами зі зменшеними оптичними діаметрами. Виконано комплекс розрахунків геометричних параметрів такої оптики. Методом алмазного лезового мікроточіння на основі розрахункових параметрів сформовано тестові зразки таких лінз.

Методом лазерної діагностики досліджено тестові зразки створених лінз. Результати досліджень лінз при їх повороті в світловому потоці підтвердили відповідність отриманих параметрів реально виготовлених лінз розрахунковим даним.

Застосування додаткових лінз в картриджі з детектором Hamamatsu S6968-01 в ряді режимів реєстрації виявилось ефективним при повороті оптичного блоку в світловому потоці на кути $\varphi < 18\text{--}20$ град. При більших кутах використання додаткових лінз не доцільне, оскільки спостерігається зменшення зареєстрованого фотодетектором випромінювання.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Antonov, E.E., Fu, M.L., Petrov, V.V., Manko, D.Yu. & Rong, K.H. (2021). Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*. Vol. 29. # 24. Pp. 38958—38970. <https://doi.org/10.1364/OE.438590>
- Antonov, E.E., Lapchuk, A.S., Petrov, V.V., Tokalin, O.A. & Zenin, V.N. (2022). Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. Vol. 25. #3. Pp. 315—322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.
- Петров В.В., Антонов Є.Є., Зенін В.М., Крючин А.А., Шанойло С.М. Мікропризмове плоско-фокусуєча френелівська оптика для систем автоматичного керування рухомими об'єктами. *Озброєння та військова техніка*. 2024. № 1(41). С. 111—121. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1\(41\).111-121](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1(41).111-121).
- Antonov, E.E., Lysenko, V.S., Manko, D.Yu., Martynyuk, I.A., Petrov, V.V. & Zenin, V.N. Plane-Focusing Fresnel Lenses for Oblique Incidence of Light Rays. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2025. Vol. 27. #2. Pp. 183—193. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.02.183>.
- Brinksmeier, E., Glabe, R. & Schonemann, L. (2012). Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. #36. Pp. 650—657. [10.1016/j.precisioneng.2012.06.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001).
- Tan, N.Y.J., Lim, Z.H., Zhou, G., Liu, K. & Kumal, A.S. (2021). Design and fabrication of composite polygonal Fresnel lenses. *Opt. Express*. Vol. 29. No 22. Pp. 36516—36534. [doi: 10.1364/OE.436290](https://doi.org/10.1364/OE.436290).
- Зенін В.М., Антонов Є.Є. Особливості розрахунку геометричних параметрів алмазного різця для формування кільцевих лінз Френеля. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2024. Т. 26. № 2. С. 73—80. <http://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/316913>
- Sultanova, N., Kasarova, S. & Nikolov, I. (2009). Dispersion properties of optical polymers, *Acta Physica Polonica A*. Vol. 116. Pp. 585—587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.
- Antonov, E.E., Kryuchyn, A.A., Mingley, Fu, Petrov, V.V., Shahoilo, S.M. & Zichun, Le. *Microprisms: Optical Parameters and Monitoring*. K.: Akademperiodika. 2015. 146 p.
- Image J Program. UPL: Image J Program. UPL: <https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>
- Antonov E.E., Fu M.L., Petrov V.V., Manko D.Yu., Rong K.H. Structure of Microprismatic Fresnel Lenses for Creating Uniform Focal Images. *Optics Express*, 2021. V.29, #24. P.38958-38970; <https://doi.org/10.1364/OE.438590>.
- Antonov E.E., Lapchuk A.S., Petrov V.V., Tokalin O.A., Zenin V.N. Photodetector module of optoelectronic control systems for tracking the moving objects. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2022. V.25, #3. P.315–322. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.03.315>.
- Petrov V.V., Antonov E.E., Zenin V.M., Kriuchyn A.A., Shanoilo S.M. Microprism Plane-Focusing Fresnel Optics for Systems of Automatic Control for Moving Objects. *Weapons and Military Equipment*, 2024. V.1(41). P.111-121. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1\(41\).111-121](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2024.1(41).111-121).
- Antonov E.E., Lysenko V.S., D.Yu.Manko, I.A.Martynyuk, Petrov V.V., Zenin V.N. Plane-Focusing Fresnel Lenses for Oblique Incidence of Light Rays. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 2025. V.27, #2. P.183-193. <https://doi.org/10.15407/spqeo28.02.183>.
- Brinksmeier E., Glabe R., Schonemann L. Diamond micro chiseling of large-scale retroreflective arrays. *Precision Engineering*. 2012. 36. P. 650-657; <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.06.001>.
- Tan N.Y.J., Lim Z.H., Zhou G., Liu K., Kumal A.S. Design and fabrication of composite polygonal Fresnel lenses. *Opt. Express*. 2021. 29, No 22. P. 36516–36534. <http://doi.org/10.1364/OE.436290>.
- Zenin V.N., Antonov E.E. Peculiarities of Calculating the Geometrical Parameters of Diamond Cutter for Ring Fresnel Lens Formation. *Data Recording, Storage & Processing*, 2024. V.26, #2. P.73-80. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316913>.
- Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. Dispersion properties of optical polymers, *Acta Physica Polonica A*, 2009. V.116. P.585-587. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585>.
- Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Mingley Fu, Petrov V.V., Shahoilo S.M., Zichun Le. *Microprisms: Optical Para-*

REFERENCES

meters and Monitoring. K.: Aradempirika. 2015. 146 p.
10. Jimage J Program. UPL:<https://soft.mydiv.net/win/download-ImageJ.html>

**Petrov V.V., Antonov E.E., Zenin V.N.,
Milevskyi V.E.**

SIMULATION OF THE OPTICAL PARAMETERS OF SPECIALIZED FLAT-FOCUSING OPTICS

An algorithm has been developed for the development of specialized plane-focusing optics with diminished light diameters, which is intended for use in automated tracking systems for moving objects. A complex of different geometric parameters of such optics has been calculated. Test samples of such lenses are formed using diamond-cutting micro-cutting technology based on the simulation results. A feature of focusing structures created by the diamond cutting technique is a discrete change in the refractive angles of microprismatic zones, resulting in the discreteness of the images formed in the focus. This is a main difference from Fresnel focusing optics with aspherical convex circular surfaces, when the angles of refraction change continuously. In the manufacture of such new devices by the diamond cutting method it is possible to obtain almost mirror working surfaces of a high optical quality. However, the size of such conical refracting zones should not be too large to reduce the discreteness of the formed images, so the new specified focusing microprisms are made from several totally identical prismatic elements. Test samples of the created lenses were examined using the laser diagnostics method. Energy characteristics of created lenses were investigated and their angular dependences were obtained. The obtained results made it possible to optimize the parameters of transforming optics and create flat-focus lenses that are more suitable for practical utilization.

Keywords: *geometric parameters of lenses, ring focusing structures, laser diagnostics of parameters for microprism lenses.*

Відомості про авторів:

Петров Вячеслав Васильович

академік НАН України
доктор технічних наук, професор
директор
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>
e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

Антонов Євген Євгенович

доктор технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України

м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>
e-mail: antv1947@gmail.com

Зенін Володимир Миколайович

науковий співробітник
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України
м. Київ, Україна
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>
e-mail: zenin51@gmail.com

Мілевський Вадим Євгенійович

провідний інженер-конструктор оптичних
та оптико-електронних приладів
Інститут проблем реєстрації інформації
Національна академія наук України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-4706-8143>
e-mail: mylevsky@ukr.net

Information about the authors:

Petrov Viacheslav

Academician of NAS of Ukraine
Doctor of Engineering Sciences, Professor
Director
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-7265-9889>
e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

Antonov Eugene

Doctor of Engineering Sciences
Senior Researcher
Leading Scientific Researcher
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-4471-8287>
e-mail: antv1947@gmail.com

Zenin Volodymyr

Scientific Researcher
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0009-0005-16653-9743>
e-mail: zenin51@gmail.com

Milevskyi Vadim

Senior Design Engineer in Optics and Optoelectronics
Institute for Information Recording
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-4706-8143>
e-mail: mylevsky@ukr.net

Стаття прийнята до редколегії 14.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

UDC 355.40:004.94:327.5

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).125-130](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).125-130)**O. M. RAKHMANYI, PhD**<https://orcid.org/0000-0002-4010-0749>*(Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv)***S. V. BAZARNYI, PhD**<https://orcid.org/0000-0001-9545-1960>**O. V. TERNOVYI, Staff Adjunct Researcher**<https://orcid.org/0000-0003-2790-7262>*(National University of Defence of Ukraine, Kyiv)*

ANALYTICAL PARAMETERS OF THE DECISION-MAKING PROCESS CONCEPT IN A MULTIDOMAIN CONFLICT

The article investigates the concept of integrated management decision support in multi-domain operations based on a data-driven governance approach (using the Palantir platform as a model). Drawing on graph, vector-matrix and probabilistic models, a methodology for the multi-criteria evaluation of decision-making effectiveness is applied. It establishes that integral management effectiveness relies on data integration and relevance, decision timeliness and the system's resilience under conditions of degradation and information overload. The scientific novelty lies in the development of a system of analytical parameters for assessing management effectiveness. The research results can be utilized to improve defense planning and crisis response within the security and defense sector.

Keywords: *security and defense sector, national security, Ukrainian Armed Forces, governance resilience, multi-domain competition, armaments, analytical parameters.*

INTRODUCTION

Modern armed conflicts are characterized by a transition from platform-centric to data-centric models of warfare, where the key resource becomes not only firepower but also the ability to integrate, process, and interpret large arrays of heterogeneous data in real time [1].

The war in Ukraine reflects the formation of a new type of operational environment – a data-centric battlespace, in which the effectiveness of the decision-making process is determined by the speed of response, the quality of information integration, the resource cost of implementing a decision, and the system's ability to adapt it to changes in the operational environment [2, 3].

Despite the development of research in the fields of artificial intelligence (hereinafter AI), multi-domain operations (MDO), and digital military technologies (battlefield management systems), the issue of integrating the concept of data-driven governance with the practices of multi-domain

confrontation and operationalizing parameters of integrated decision support remains insufficiently studied [4, 5].

In the context of war, data-driven governance acquires the features of algorithmic management, where a decision is formed based on integrated analytical processes that combine human expertise and machine data processing [6]. At the same time, such a model creates new challenges associated with data dependency, risks of algorithmic bias, and a decrease in the role of individual experience in the decision-making process [7, 8].

A key characteristic of modern multi-domain confrontation is the interaction of domains and their synchronization through a unified information infrastructure, which ensures the formation of holistic situational awareness and contributes to the realization of the joint effects concept. Similar technological approaches are gaining relevance in Middle Eastern conflicts, where digital infrastructure and data processing are becoming critical elements of national security. One of the defining parameters of modern armed conflicts is the ability of state and military management systems to maintain functionality even in the event of the loss of a significant part of their leadership. In particular, the conflict in the Middle East demonstrates that targeting (namely, the physical destruction) of high-level state officials does not always lead to the collapse of the decision-making system [10].

Thus, a scientific contradiction arises between the growing role of digital platforms in modern warfare and the insufficient development of a parameter system with which their impact on management efficiency and resilience can be evaluated. Within the study, it is advisable to understand the effectiveness of the decision-making process as an integral indicator reflecting the management system's ability to transform information into timely, resource-justified, and effective actions. In the modern conditions of multi-domain confrontation, effectiveness cannot be interpreted merely as the «correctness» of a decision, but must be evaluated through the balance of three basic components: effectiveness, promptness, and efficiency. It is this interpretation that allows moving from a descriptive understanding of decision-making to its formalized analytical evaluation.

ANALYSIS OF PUBLICATIONS

The modern scientific discourse testifies to a change in the nature of armed conflicts, where traditional models are being replaced by the concept of the data-centric battlespace. As noted in the works of [11], digital platforms and cloud technologies are ceasing to be merely auxiliary tools, becoming the foundation of state sovereignty [12] and military effectiveness. The study [10] emphasized that the implementation of intelligent systems in public administration requires the development of new evaluation indices that would take into account the specifics of automated decision-making. This correlates with our proposal to use a platform approach to ensure the coherence of the operational picture in conditions of multi-domain interaction.

A critical aspect of multi-domain confrontation is maintaining the functional resilience of control loops when individual leadership links are lost. Study [13] focuses on

the need to preserve «human agency» in AI-based systems, which is especially important for preventing algorithmic bias under conditions of high-intensity combat operations. At the same time, the experience of conflict escalation in 2025–2026, analyzed in the context of Middle Eastern events and NATO Allied Command Transformation reports [14], proves that a system's viability is determined not by its personnel composition, but by its distributed management architecture and the algorithmic delegation of authority. Our model complements these views by introducing the parameters «Control Loop Resilience» and «Centralization Level», which makes it possible to mathematically evaluate the survivability of the management system [15].

The transition to the practical implementation of multi-domain operations (MDO) requires strict mathematical formalization of interaction processes. The foundation for this is the game-theoretic model of multi-domain interaction proposed by [16], which allows for modeling conflict scenarios considering the dynamics of different domains. Scientific work [17] points out existing gaps in Data Science methodology during military decision-making, particularly regarding data speed and relevance. Research [9] further highlights the significance of data and analytics for detecting failures in intelligence and control processes.

Accordingly, the conducted analysis of scientific sources reflects that the topic of integrated decision-making support in multi-domain confrontation lies at the intersection of digital governance, military data science, and platform war infrastructure research. However, the issue of formalizing the analytical parameters of such support remains insufficiently developed, which determines the scientific direction of this study. At the same time, the analysis of scientific approaches gives grounds to assert that the effectiveness of the decision-making process in modern digital management systems should be evaluated not as an isolated result, but as a function of several interrelated variables.

These include the quality of achieving the set goal, resource expenditure on the formation and implementation of the decision, temporal response characteristics, and the system's ability to adapt the decision to changes in the baseline conditions. In this context, data-driven governance parameters should be interpreted as tools for measuring the system's technical capability and its managerial effectiveness.

The purpose of the article: to substantiate the conceptual foundations of integrated decision-making support in conditions of multi-domain confrontation and to develop a system of analytical parameters for evaluating management effectiveness based on the data-driven governance approach, utilizing the functional capabilities of digital platforms.

RESEARCH RESULTS

Thus, the resilience of a management system under conditions where the management vertical is targeted can be provided by organizational mechanisms and technological solutions that form a unified information environment for distributed decision-making. In this context, platforms like Palantir function as a tool for implementing such a management model, where the system-forming factor is not the hierarchy, but the integrated information architecture.

Indicative of modern multi-domain confrontation is the analytical effect of preserving a state system's functionality even after large-scale targeting of the command vertical [13, 14]. The events surrounding the escalation of Iran's military confrontation in 2026 showed that the elimination of a number of key political figures did not lead to an automatic management collapse: the Iranian system continued its military-political activities and maintained the ability to conduct active retaliatory actions. This provides grounds to believe that the resilience of a management system in modern warfare is determined not only by the personnel composition of top-level leadership but by a distributed management architecture, redundancy of command functions, standardized response scenarios, and the ability to rapidly integrate data from various domains into a single decision support environment. The presence of standardized response scenarios, command function redundancy, and elements of algorithmic delegation contributes to maintaining the system's functionality autonomously if communication with the management center is lost.

Following this logic, integrated digital platforms like Palantir must be viewed not just as technical tools, but as elements of data-driven governance [18, 19], which potentially reduces the system's dependence on individual personal decision-making centers and increases its functional survivability in a decentralized conflict. In the context of modern war, the formal form of government does not fully explain the resilience of the management system. Equally important is the type of political regime, since it determines the degree of power centralization, the nature of information exchange, accountability, the flexibility of power delegation, and the system's capacity to sustain functionality upon the loss of specific leadership links. Democratic, authoritarian, theocratic-authoritarian, and totalitarian management models differ in their political organization and decision-making architecture, directly impacting the possibilities of data-driven governance in multi-domain confrontation.

In view of the above, a question arises concerning the theoretical description of integrated decision support and the formation of a parameter system facilitating its analytical evaluation. The system of analytical parameters developed by us (Table 1) directly addresses this challenge, proposing specific metrics – from time delay to integral effectiveness – enabling the conversion of theoretical advancements into applied tools for defense planning. To operationalize the assessment of management efficiency in a multi-domain environment, the system of analytical parameters detailed in Table 1 was developed.

The provided comparative parameters demonstrate that amid the war in Ukraine and the escalation of the armed conflict in Iran, the key factor for management resilience is not solely the availability of military force, but also the capacity to integrate diverse data, rapidly transform it into operational knowledge, and support decision-making in a multi-domain environment. This justifies the need to study the Palantir platform as a model of integrated decision-making process support.

Conditionally, the graph will be represented in a formula as a multidimensional function:

$$E = f(T_d, D_i, D_r, D_t, C_o, L_c, H_o, S_r, C_c, I_m), \quad (1)$$

Table 1

Parameter	Technical and Analytical Content	Metric
Decision-making time delay	Interval between the initial signal and the formation of the decision	seconds/minutes
Completeness of data integration	Degree of data source coverage in the analytical system	from 0 to 1
Data reliability	Probability of data (verification, non-contradictory nature)	from 0 to 1 (%)
Data relevance	Degree of data relevance (freshness)	seconds/minutes
Intensity of multi-domain interaction	Level of simultaneous domain impact	from 0 to n
Coherence of the operational picture	Degree of data consistency between subsystems	from 0 to 1
Load on the subject	Level of cognitive overload of the commander	index, from 0 to 1
Control level	Share of decisions remaining under human oversight	from 0 to 1
Resilience of the control loop	System's ability to maintain functionality upon the loss of individual centers or channels	from 0 to 1
Centralization level of management architecture	Degree of system dependence on a single center	from 0 to 1
Speed of interagency interaction	Pace of information exchange between different agencies	minutes/hours
Integral effectiveness	Total system performance (weighted sum of parameters)	from 0 to 1

where:

- T_d – time delay of decision-making;
- D_i – completeness of data integration;
- D_r – data reliability;
- D_t – data relevance;
- C_o – coherence of the operational picture;
- L_c – cognitive load of the subject;
- H_o – level of human oversight;
- S_r – resilience of the control loop;
- C_c – centralization level;
- I_m – intensity of multi-domain interaction.

The graphical interpretation of the analytical parameter system reflects the dependence of the decision-making process's integral effectiveness on the set of key data-driven governance variables within a multi-domain operational environment (Fig. 1).

The X-axis (infrastructure degradation level, %) reflects the percentage loss of management system elements (communication, decision-making centers, leadership personnel). The Y-axis (functional resilience) is an integral indicator combining the parameters «time delay» (having an inverse exponential relationship to efficiency), «data reliability», and «coherence of the operational picture».

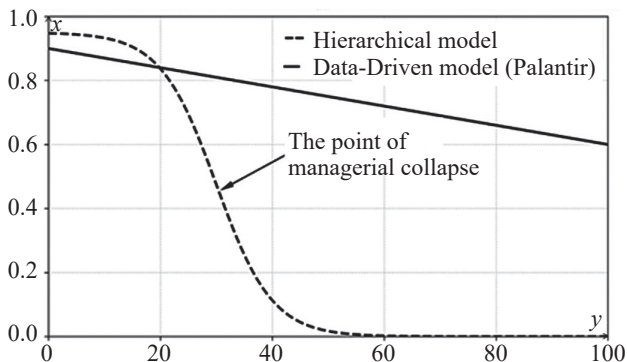


Fig. 1. Functional dependence of decision-making efficiency on key parameters of data-driven governance in multi-domain confrontation

The curve for the hierarchical model (dashed line) can be mathematically described as a tree-like structure with a high «Centralization Level». In such a system, removing the root node (top leadership) results in the severing of all connections, subsequently paralyzing the management system.

The curve for the data-driven model (solid line) is based on a graph model of distributed management. Owing to the «completeness of data integration» and «coherence of the operational picture», the system remains operational even if 50–70 % of the nodes are removed, as information and decision-making authority are duplicated across the network.

The graph illustrates an inverse U-shaped relationship for the human oversight parameter: an excessively low level → risk of algorithmic errors; an excessively high level → increased latency; an optimal level → maximum efficiency. Decreasing the time delay in decision-making leads to an exponential increase in efficiency, particularly during high-intensity combat phases. This substantiates the thesis concerning the compression of decision cycles in contemporary warfare. The completeness of data integration exhibits a threshold nature; up to a certain level, the effect is minimal, but upon reaching a critical value, there is a sharp increase in efficiency corresponding to the concept: data fusion → situational awareness → decision superiority.

An increase in the subject load parameter leads to efficiency degradation, even alongside high-quality data, demonstrating that data abundance ≠ decision advantage without appropriate analytical processing. The parameter for control loop resilience dictates the system's area of stability; at high values, the system preserves its efficiency even under conditions of: loss of management links, degradation of communication channels, information attacks. The centralization parameter possesses contextual dependency: under stable conditions → centralization enhances control, while under combat conditions → excessive centralization diminishes adaptability.

In this context, platforms like Palantir serve as tools for optimizing this multidimensional function, as they provide a simultaneous improvement in the completeness of data integration and coherence, a reduction in decision-making time delay, and the maintenance of an optimal balance between automated analysis and human control. Thus, Palantir acts as both a technological solution and a functional element of algorithmic management within a data-driven governance system.

To demonstrate the necessity of researching integrated decision-making support in multi-domain confrontation, it is beneficial to utilize a system of analytical parameters that capture both the technological and managerial dimensions of digital platforms' functioning. The outlined criteria determine the quality of data-driven governance via the parameters of decision-making delay, completeness of data integration, data reliability, coherence of the operational picture, level of human control, and the resilience of control loops. Collectively, these variables provide a foundation for conducting a comparative analysis of modern theaters of war, specifically the Ukrainian and Middle Eastern theaters, facilitating an evaluation of the Palantir platform as a model for an integrated decision support system.

CONCLUSIONS

Over the course of the study, it was substantiated that under conditions of multi-domain confrontation, the resilience of state management transitions from a hierarchical to a network model, where the defining parameter is the implementation of a data-driven governance approach based on integrated digital platforms. It has been established that employing systems such as Palantir helps overcome the systemic effect of management collapse upon the loss of the management vertical through the algorithmic delegation of authority, the redundancy of command functions, and data synchronization within a unified information environment.

The developed system of analytical parameters operationalizes the evaluation of decision-making effectiveness while factoring in the specific characteristics of the political regime and the risks of algorithmic bias. Ultimately, the functional survivability of a modern state system in a decentralized conflict relies heavily on its capacity to convert large arrays of data into holistic situational awareness and a coherent operational picture. It is proven that in multi-domain confrontation, a management system's resilience is increasingly dictated by its institutional hierarchy alongside its integrated information architecture.

A system of analytical parameters operationalizing the assessment of integrated decision support was proposed. Platforms such as Palantir operate as model solutions for decreasing decision latency, reinforcing data fusion, and heightening the coherence of the operational picture. Future research should focus on the empirical validation of the proposed parameter system, the construction of an integral efficiency index, and the testing of the model utilizing data from actual management systems within the security and defense sector.

REFERENCES

1. Kramer, F., Dailey, A. M., & Brodfuehrer, J. A. (2024). NATO multidomain operations: Near- and medium-term priority initiatives. Atlantic Council Scowcroft Center for Strategy and Security. URL: <https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2024/03/NATO-multidomain-operations-Near-and-medium-term-priority-initiatives.pdf> (accessed: 23.02.2026).
2. "Ministerstvo oborony Ukrainy. Ukraina pershoiu v sviti vidkryvaie dlia partneriv dostup do trenuvannia AI-modelei na realnykh danykh z polia boiu. Ofitsiyni vebportal MOU" [Ministry of Defense of Ukraine. (2026, March 12). Ukraine is the first in the world to open access to partners for training AI models on real battlefield data. Official web portal of the Ministry of Defense of Ukraine]. Available at: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-pershoyu-v-sviti-vidkrivaye-dlya-partneriv-dostup-do-trenuvannya-ai-modelej-na-realnih-danij-z-polya-boyu> (accessed: 25.02.2026).
3. Aerospace & Defence. (2026, March 26). German Army Eyes AI To Expedite Wartime Decision-Making. Aerospace & Defence News. URL: <https://www.aerospace-and-defence.com/german-army-ai-expedite-wartime-decisions/> (accessed: 03.03.2026).
4. Monarcha-Matlak, A. (2021). Automated decision-making in public administration. *Procedia Computer Science*. # 192. Pp. 2077—2084. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.215> (accessed: 03.03.2026).
5. Rizk, A., & Lindgren, I. (2024). Automated Decision-Making in the Public Sector: A Multidisciplinary Literature Review. *Electronic Government. EGOV 2024. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 14841. Pp. 237—253. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70274-7_15. (hal-05016588).
6. Schmeling, J., Al Dakruni, S., & Mergel, I. (2025). Data collaboration in digital government research: A literature review and research agenda. *Government Information Quarterly*. # 42(3). 102063. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2025.102063>.
7. Downey, A. (2025). The alibi of AI: algorithmic models of automated killing. *Digital War*. # 6(1). <https://doi.org/10.1057/s42984-025-00105-7>.
8. Csernaton, R., Broeders, D., Andersen, L. H., & Schwarz, E. (2025). Myth, Power, and Agency: Rethinking Artificial Intelligence, Geopolitics and War. *Minds and Machines*. # 35(3). <https://doi.org/10.1007/s11023-025-09741-0>
9. Kern, L., Gustafson, K., & Hansen, M. E. (2026). Leveraging data science to investigate intelligence failures. *Intelligence and National Security*. <https://doi.org/10.1080/02684527.2025.2607374>.
10. Feng, R. et al. (2025). Data-driven governance: Developing evaluation indices for China's intelligent political and legal systems. *Sustainable Futures*. # 10. 101207. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101207>.
11. Broeders, D., Sukumar, A., Kello, M., & Andersen, L. H. (2025). Digital corporate autonomy: geo-economics and corporate agency in conflict and competition. *Review of international political economy*. # 32(4). Pp. 1189—1213. Advance online publication. URL: <https://doi.org/10.1080/09692290.2025.2468308>.
12. Javadi, M. (2025). Infrastructural entanglement and cloud hyperscalers in contemporary warfare: Insights from Ukraine, Israel and Taiwan. *Contemporary Security Policy*.

- # 47(2). Pp. 1—38. <https://doi.org/10.1080/13523260.2025.2593247>.
13. Bode, I., Nadibaidze, A., Watts, T. F. A., & Zhang, Q. (2025). Ensuring the exercise of human agency in AI-based military systems: concerns across the lifecycle. *Ethics and Information Technology*. # 27(4). <https://doi.org/10.1007/s10676-025-09861-2>.
 14. NATO Allied Command Transformation. (2024). *Multi-Domain Operations: 2024 Report*. NATO ACT Publications. <https://www.act.nato.int/wp-content/uploads/2024/05/2024-MDO-Report-LR.pdf> (accessed: 13.03.2026).
 15. Husak, Yu. A. & Bazarnyi, S. V. (2026). “Metod optimalnogo upravlinnia stiikestiu derzhavnoi systemy yak skladnoho dynamichnoho obiekta v bahatodomennomu prostori. Enerhetychnyi front: shostyi teatr voienykh dii (strategiia zakhystu, upravlinnia ta vidnovlennia)” [Method of optimal management of state system resilience as a complex dynamic object in a multi-domain space. *Energy Front: The Sixth Theater of War (Strategy of Defense, Management and Recovery)*]. K. March, 27. Pp. 63—66. <https://ipme.kiev.ua/konferencii/energy-front-2026/>.
 16. S. Bazarnyi, Y. Husak, T. Voitko, F. Aliew & S. Yevseiev. (2025). Mathematical model of multi-domain interaction based on game theory. *Advanced Information Systems*. Vol. 9. No. 3. Pp. 22—31. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.03>.
 17. Meerveld, H., & Lindelauf, R. (2024). *Data Science in Military Decision-Making: Foci and Gaps*. *Global Society*. # 39(1). Pp. 1—27. <https://doi.org/10.1080/13600826.2024.2353657>.
 18. Mattingsdal, J. (2025). When seconds count: a data-driven exploration of military leaders’ performance in simulated irregular warfare. *Small Wars & Insurgencies*. <https://doi.org/10.1080/09592318.2025.2588440>.
 19. Zhyvotovskiy, R. (2026). “Rozroblennia metodyky formalizatsii danykh dlia pobudovy tsyfrovyykh dviinykiv zasobiv povitrianoho napadu. Ozbroyennia ta viiskova tekhnika” [Development of a data formalization methodology for constructing digital twins of air attack assets]. *Weapons and Military Equipment*. # 49(1). Pp. 76—83. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1\(49\).76-83](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1(49).76-83)

Рахманій О.М., Базарний С.В., Терновий О.В.

АНАЛІТИЧНІ ПАРАМЕТРИ КОНЦЕПЦІЇ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ БАГАТОДОМЕННОГО ПРОТИСТОЯННЯ

У статті досліджується концепція інтегрованої підтримки процесу прийняття управлінських рішень в умовах сучасного багатодоменого протистояння на основі платформеного підходу data-driven governance. Обґрунтовано трансформацію характеру збройного протистояння, розвиток multi-domain operations, зростання ролі цифрової інфраструктури, штучного інтелекту, аналітики великих даних та систем decision support. Платформу Palantir розглянуто як аналітичну модель інтегрованої системи підтримки прийняття рішень, здатної забезпечувати data ingestion, data

fusion, багаторівневу аналітичну обробку інформації та формування єдиної операційної картини для органів військового управління, сектору безпеки і оборони та інших суб'єктів державного управління.

Методологія дослідження ґрунтується на сукупності моделей, зокрема – графові, векторно-матричні, імовірнісні та застосовані багатокритеріальні підходи безпосередньо для оцінювання ефективності процесу прийняття рішень у багатодоменому операційному середовищі. Встановлено, що інтегральна ефективність управління визначається ступенем інтегрованості даних, їх достовірністю та релевантністю, часовою придатністю рішення, ресурсною вартістю його реалізації та здатності системи до адаптивного коригування управлінського циклу, а також здатністю системи зберігати функціональну стійкість за умов децентралізації, інформаційного переважання, деградації окремих ланок управління та втрати їх частини.

Результати дослідження можуть бути використані для подальшого розвитку доктринальних підходів до інформаційного забезпечення управління, а також формування перспективних рішень у сфері оборонного планування, кризового реагування та управління в секторі безпеки і оборони.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні та операціоналізації системи аналітичних параметрів інтегрованої підтримки прийняття рішень, які дозволяють оцінювати ефективність управління в умовах багатодоменого протистояння.

Ключові слова: сектор безпеки і оборони, безпека держави, Сили оборони України, стійкість управління, багатодоменне протистояння, озброєння, аналітичні параметри.

Відомості про авторів:

Рахманій Олександр Миколайович

доктор філософії

заступник начальника науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки спеціальних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-4010-0749>

e-mail: Rachmanuch@gmail.com

Базарний Сергій Васильович

доктор філософії

заступник начальника науково-дослідного відділу дослідження проблем розвитку та впровадження стратегічних комунікацій інституту стратегічних комунікацій Національний університет оборони України м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-9545-1960>

serhii.bazarnyi@edu.nuou.org.ua

Терновий Олександр Васильович

ад'юнкт штатний наукового відділу організації
підготовки та атестації науково-педагогічних кадрів
науково-методичного центру організації наукової
та науково-технічної діяльності
Національний університет оборони України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2790-7262>
ternovyi@edu.nuou.org.ua

Information about the authors:**Rakhmanyi Oleksandr**

PhD, Deputy Head of the Research Department for
the Development of Weapons and Military Equipment
of Support Forces of the Research Department for the
Development of Weapons and Military Equipment of
Special Forces
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4010-0749>
e-mail: Rachmanuch@gmail.com

Bazarnyi Serhii

PhD, Deputy Head of the Research Department for
the Study of Issues Related to the Development and
Implementation of Strategic Communications Strategic
Communications Institute
National Defence University of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9545-1960>
serhii.bazarnyi@edu.nuou.org.ua

Ternovyi Oleksandr

Staff Adjunct Researcher
Scientific Department for the Organization of Training
and Certification of Scientific and Pedagogical Personnel,
Scientific and Methodological Center for the Organization
of Scientific and Scientific-Technical Activities
National University of Defence of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2790-7262>
ternovyi@edu.nuou.org.ua

The article was received by the editorial board on 08.04.2026.

The article accepted for publication after review 21.05.2026.

The article is published 30.06.2026.

УДК 623.76:623.4.017:629.1

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).131-136](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).131-136)

І. І. ЗАЛІСКО, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-8353-9524>
(Дрогобицький завод автомобільних кранів,
м. Дрогобич)

С. М. ГІМБЕР, інженер
<https://orcid.org/0000-0002-7616-3944>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, м. Київ)

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МОБІЛЬНИХ КРАНІВ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ШАСІ ДЛЯ УМОВ АКТИВНИХ БОЙОВИХ ДІЙ: СТРУКТУРНА НАДІЙНІСТЬ, БАЛІСТИЧНИЙ ЗАХИСТ І ЖИВУЧИСТЬ

У статті обґрунтовується актуальність і науково-практична значущість нового дослідницького напрямку – системного аналізу мобільних кранів на автомобільному шасі як бойових технічних систем в умовах БПЛА-насиченого простору протиборства. На основі аналізу чотирьох тематичних кластерів рецензованої літератури встановлено системний розрив між академічними досягненнями у галузях механіки конструкцій, балістичного матеріалознавства, теорії управління та військової аналітики і відсутністю синтезуючого міждисциплінарного підходу до опису крана як єдиної бойової системи. Виявлено п'ять ключових наукових протиріч, що формують наукову проблему дослідження. На основі досвіду збройного конфлікту в Україні 2022–2026 рр. охарактеризована трансформація загроз для неброньованої інженерної техніки з боку FPV-БПЛА і показана принципова нерозв'язаність цієї проблеми в межах будь-якої окремої дисципліни. Запропоновано структуру чотирьохмодульної дослідницької програми з визначенням наукових завдань, методів і цільових журналів для публікацій. Стаття обґрунтовує актуальність і проблематику нового дослідницького напрямку.

Ключові слова: мобільний кран, бойова технічна система, балістичний захист, STANAG 4569, FPV-БПЛА, структурна надійність, телескопічна стріла, дистанційне управління, живучість, інженерне озброєння.

ВСТУП І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний збройний конфлікт в Україні є першим великомасштабним протистоянням, у якому безпілотні літальні апарати (БПЛА) першої особи (FPV – First Person View) і барражуючі боєприпаси стали відповідальними за більшість технічних втрат обох сторін. За оцінками незалежних аналітиків, що спираються на верифіковану відео документацію, FPV-дрони забезпечують понад 65 % підтверджених втрат бронетехніки у 2024...2025 рр. [1]. Ці дані свідчать щодо принципової зміни тактичного середовища: ефективне ведення бойових дій більше не гарантується традиційними стандартами бронезахисту, що розроблені у другій половині ХХ ст.

У цьому контексті особливої уваги набуває клас військової техніки, що донедавна вважався виключно засобом тилового інженерного забезпечення – мобільні крани на автомобільному шасі. В Збройних Силах України (ЗСУ) ці машини, зокрема серія КТА (Крани Телескопічні Автомобільні), систематично використовуються для наведення переправ і мостів, монтажу фортифікаційних споруд, евакуації пошкодженої бронетехніки та будівництва захисних позицій – безпосередньо у прифронтовій зоні. Виконання цих завдань вимагає тривалої (30...120 хв.) нерухомості машини у визначеній точці, тоді як насиченість ближніх і середніх дистанцій розвідувальними і ударними БПЛА перетворює кран на статичну ціль у перманентно спостережуваному просторі.

Незважаючи на очевидну операційну значущість цього класу техніки, системне академічне дослідження, що описує мобільний кран як бойову систему з кількісно визначеним профілем конкуруючих параметрів виживання, захисту, конструктивної надійності і управління, у відкритій науковій літературі відсутнє. Рецензований публікаційний масив охоплює відповідні теми лише фрагментарно і дисциплінарно ізольовано: роботи з оптимізації стрілових конструкцій [2–4] не враховують польових режимів навантаження; дослідження балістичних матеріалів для бойових машин [5, 6] не розглядають специфічного компромісу між масою броні і підйомним потенціалом крана; теорія управління кранами [7–9] не інтегрує умов РЕБ-деградованого середовища; і жодна з військово-аналітичних праць не формалізує ризик ураження оператора неброньованого крана як функцію тактичних параметрів.

Метою цієї статті є: (а) систематизувати наявні дослідницькі кластери і виявити їх методологічні обмеження; (б) сформулювати наукові протиріччя і наукову проблему дослідження; (в) обґрунтувати структуру та зміст єдиної дослідницької програми, спрямованої на заповнення виявленого системного розриву.

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ І ВИЯВЛЕННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИХ КЛАСТЕРІВ

Систематичний огляд публікацій за чотирма тематичними напрямками дозволяє виявити структуру наявного знання і окреслити її межі.

Структурна оптимізація стрілових систем і аутригерів (Кластер 1)

Публікаційна база з оптимізації несучих конструкцій кранів є технічно зрілою і охоплює три хвилі методо-

логічного розвитку. Перша хвиля – детерміністична оптимізація мінімізації маси при обмеженнях на напруження і прогин методом скінченних елементів (МСЕ): зокрема, параметрична МСЕ-модель дозволила знизити масу телескопічної стріли автокрана на 24,3 % при збереженні нормативних параметрів [2]. Друга хвиля – надійнісно-орієнтоване проектування (RBDO): інтеграція методу поверхні відклику з багатоострівним генетичним алгоритмом (MIGA) скорочує обчислювальні витрати RBDO приблизно втричі [3]. Третя хвиля – багатоцільова оптимізація з гібридними сурогатними моделями RSM-RBFNN і алгоритмом NSGA-II, що формує Парето-фронт із 147 недомінованими рішеннями для телескопічної стріли спеціальних транспортних засобів [4].

Принципова вада всього масиву: режими навантаження у всіх роботах відповідають стандартам ISO 4301 і EN 13000, що регламентують квазістатичні підйомні операції у цивільних умовах. Жодна з праць не враховує ударних збурень від руху бездоріжжям, вібраційних збурень у польових умовах або ударних хвиль від близьких підривів. Між тим поєднання зазначених збурень з підйомним навантаженням формує якісно новий режим, для якого цивільні оптимальні конструкції можуть мати суттєво знижений ресурс.

Балістичний захист і матеріальний компроміс (Кластер 2)

Стандарт STANAG 4569 (NATO AEP-55) визначає шість рівнів балістичного захисту для броньованих автомобілів від 7,62 мм (рівень 1) до 30 мм APFSDS (рівень 6) і встановлює вимоги до комплексного захисту від кінетичних загроз, артилерійських осколків і підривних пристроїв [10]. Новітні дослідження в галузі матеріалознавства демонструють значний прогрес: ламінована система на основі В4С-кераміки, арамідного підкладу і задньої пластини із AA2024-CNT (алюмінієво-матричний композит із вуглецевими нанотрубками) забезпечує захист рівня 4+ STANAG 4569 при питомій поверхневій щільності менше 100 кг/м² [5]; системи на основі Twaron і Endurmax верифіковані для умов багаторазового влучання на рівні 1 [6].

Однак принципова вада цього масиву для кранових застосувань полягає у тому, що всі роботи проектують захист для бойових броньованих машин (ББМ), де додаткова маса броні не впливає безпосередньо на функціональну ефективність. Для крана кожен кілограм захисної конструкції прямо вираховується з вантажного моменту – тобто є конкурентним конструктивним параметром, а не лише операційним обмеженням. Формальна задача Парето-оптимізації «рівень захисту STANAG – вантажний момент крана» у наявній науковій літературі не формулювалась і не вирішувалась.

Цифрові системи управління і автономне керування (Кластер 3)

Теорія управління кранами з придушенням коливань вантажу (anti-sway control) є зрілим субкластером із виразним прогресом у поточному десятилітті: від класичних PID- і LQR-регуляторів до MPC на базі MuJoCo-фізичного симулятора у реальному часі [7]. Адаптивне предикативне управління із data-driven моделюванням

запропоновано як альтернативу фізичним моделям для мостових кранів [8]; нейромережеві оцінювачі для компенсації гідродинамічних сил підводних кранів верифіковані через аналіз Ляпунова [9]. Системи LICCON (Liebherr Computed Control) і SPACEevo інтегрують захист від перевантаження і пропорційне гідравлічне управління у єдиний обчислювальний комплекс.

Методологічна прогалина кластера: жодна з публікацій не розглядає проблему GPS-незалежного абсолютного позиціонування гака мобільного крана в умовах РЕБ (радіоелектронної боротьби). Армія США розробляє автономні понтонні катери, де GPS-автономія є ключовою технологією [11], але координаційна задача «кран на березі + автономні катери на воді» як єдиний розподілений агентний комплекс не формалізована. Критична дилема між складністю алгоритму (RL, MPC) і надійністю в умовах DDIL-середовища не вирішена.

Операційна уразливість і ефективність у БПЛА-насиченому просторі (Кластер 4)

Конфлікт в Україні є безпрецедентним операційним середовищем для вивчення загроз від ударних БПЛА. За даними аналітиків, дрони відповідальні за більшість підтверджених втрат бронетехніки [1]. Аналітика підтверджує, що FPV-дрони є найпоширенішим засобом ураження, а зони безпосереднього контакту з противником трансформувались у «зони смерті», де навіть важкоброньована техніка функціонує лише при мінімальному відкритому перебуванні [12]. Роботизовані платформи ЗСУ за оцінками знизили втрати особового складу до 30 % на ключових ділянках [13].

Принципова академічна прогалина: кількісна модель ймовірності ураження неброньованого крана як функції від конфігурації захисту, тривалості операції, відстані до лінії зіткнення і насиченості ударними БПЛА у науковій літературі відсутня. Система обліку втрат техніки (Orux, Warspotting) фіксує втрати бронетехніки із значно вищою повнотою, ніж інженерну техніку – і це само по собі є методологічною проблемою для кількісних досліджень.

НАУКОВІ ПРОТИРІЧЧЯ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Аналіз чотирьох кластерів дозволяє виявити п'ять взаємопов'язаних наукових протиріч (табл. 1).

НАУКОВА ПРОБЛЕМА І МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

На підставі виявлених протиріч наукова проблема дослідження формулюється таким чином: відсутність системної науково-методологічної основи, що описує мобільний кран на автомобільному шасі як бойову технічну систему з кількісно визначеним профілем конкуруючих параметрів виживання, захисту, конструктивної надійності і управління, адаптованих до умов БПЛА-насиченого простору протиборства, унеможливило обґрунтований вибір проектних рішень і операційних обмежень, що відповідають реальному рівню загроз на сучасному полі бою.

Мета дослідження: розробити науково-методологічні основи системного аналізу та проектування мобільних кранів на автомобільному шасі як бойових технічних систем шляхом формалізації ієрархії конкуруючих па-

Таблиця 1. Наукові протиріччя дослідження

№	Існуюче знання (теза)	Реальна потреба (антитеза)
П1	Методи МСЕ-оптимізації стрілових систем верифіковані для квазістатичних підйомних режимів за ISO 4301	Польовий режим поєднує підйомне, ударне і вібраційне навантаження, для якого цивільна оптимальна конструкція може мати критично знижений ресурс
П2	Балістичне матеріалознавство розробляє легкі захисні системи STANAG 4569 для ББМ, де маса не конкурує з функціональністю	Маса бронювання кабіни крана прямо і кількісно знижує вантажний момент — функціональний параметр підйомної машини; цей компроміс ніде формально не описаний
П3	Теорія управління кранами з anti-sway забезпечує точне позиціонування вантажу за наявності GPS і стабільного комунікаційного каналу	DDIL-середовище бойового простору руйнує GPS-залежну навігацію і при затримці >150 мс порушує стійкість замкнутого контуру управління
П4	Кран традиційно класифікується як засіб тилового інженерного забезпечення з нормативними режимами роботи в захищених умовах	Фактичне застосування кранів у прифронтовій зоні з тривалою нерухомістю перетворює їх на пріоритетні статичні цілі для FPV-БПЛА
П5	Кожна профільна дисципліна має власний методологічний апарат для аналізу крана, але лише у межах своїх параметрів	Відсутній синтезуючий фреймворк, що одночасно враховує захист, конструктивну надійність, управління і операційний ризик як конкуруючі параметри єдиної системи

раметрів виживання оператора, балістичного захисту, конструктивної надійності під комбінованим навантаженням і живучості управління в умовах РЕБ-деградованого середовища та встановлення кількісних порогових умов, за яких виконання кранових операцій є операційно прийнятним з точки зору ризику ураження.

Об'єктом дослідження є мобільний автомобільний кран (репрезентативний зразок – серія КТА-25/КТА-32 на шасі КраЗ-63221) у прифронтовій зоні як технічна система, що одночасно виконує інженерні підйомно-монтажні завдання і функціонує під загрозою ураження засобами ближнього повітряного нападу.

Предметом дослідження є система конкуруючих параметрів «маса ретрофітного бронювання – вантажний момент – рівень балістичного захисту оператора», «режим навантаження – ресурс конструкції – вид і величина збурення», «точність позиціонування – стійкість контуру управління – рівень РЕБ-деградації» і «ймовірність ураження крана – тривалість операції – відстань до лінії зіткнення».

СТРУКТУРА ЧОТИРЬОХМОДУЛЬНОЇ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ПРОГРАМИ

Запропонована дослідницька програма складається з чотирьох взаємопов'язаних модулів, зв'язаних ланцюгом передачі результатів: вихідні параметри попереднього модуля є вхідними обмеженнями для наступного.

Модуль 1 (M1): Операційна уразливість і порогові умови виживання

M1 є стратегічно вхідним модулем, що визначає умови задачі для решти програми. Центральним завданням є розробка аналітичної моделі умовної ймовірності P(kill | detection) для неброньованого крана від FPV-БПЛА з кумулятивним або осколковим зарядом. Модель будується на аналізі уразливості критичних вузлів: гідравлічної системи, кабіни оператора і блоку керування. Агентно-орієнтована симуляція «кран + БПЛА-середовище» параметризується за рівнем насиченості дронами, дальністю виявлення, тривалістю операції і наявністю засобів прикриття РЕБ. Аналіз «вартість–ефективність» (Cost-Effectiveness Analysis – CEА) порівнює ймовірнісні витрати від ураження з вартістю ретрофітного бронювання. Методи: дерево відмов (FTA), метод Монте-Кар-

ло, агентно-орієнтоване моделювання (АВМ). Цільовий журнал: Military Operations Research.

Модуль 2 (M2): Ретрофітне бронювання кабіни – матеріальний і масовий компроміс

M2 отримує від M1 цільові показники рівня захисту і масових обмежень. Завдання: побудувати Парето-фронт «рівень захисту STANAG 4569 – вантажний момент крана» для серії КТА, визначити оптимальні матеріальні рішення (В4С-кераміка + арамідний підклад + Hardox 440 або ARMOX 440T + UHMWPE залежно від температурних умов) і верифікувати вібраційну надійність клейових з'єднань кераміки при польових циклах. Методи: аналітична модель «поверхнева щільність – вантажний момент», Cohesive Zone Model (CZM) для аналізу розшарування, порівняльний балістичний аналіз конфігурацій. Цільовий журнал: Defence Technology (Elsevier, Q1).

Модуль 3 (M3): Структурна надійність стрілового комплексу під комбінованим навантаженням

M3 отримує від M1 характеристики прифронтових ударних збурень і від M2 уточнені масові параметри конструкції. Завдання: верифікувати граничні стани несучих конструкцій КТА-32 (сталь DOMEX S700–S960) при комбінованому навантаженні «квазістатичний підйом + стохастичне дорожнє збурення + ударна хвиля від близького підриву» і встановити умови збереження ресурсу. Методи: ANSYS LS-Dyna або Abaqus Explicit (нелінійна динаміка), LEFM (лінійна пружна механіка руйнування) для оцінки ресурсу при Low-Temperature Toughness (LTT), термічний аналіз матеріалів S700/S960 при діапазоні –40 °С...+50 °С. Цільовий журнал: Engineering Structures (Elsevier, Q1) або International Journal of Impact Engineering (Elsevier, Q1).

Модуль 4 (M4): GPS-незалежне дистанційне управління в умовах DDIL-середовища

M4 є найбільш технологічно перспективним і найвіддаленішим від негайного впровадження. Завдання: розробити архітектуру GPS-незалежного позиціонування гака (злиття IMU + UWB + стереоскопічний зір через Extended Kalman Filter), встановити порогові параметри комунікаційної затримки для збереження стійкості системи (аналіз Паде для системи з чистою часовою затримкою), верифікувати через Hardware-in-the-Loop

M1: Уразливість (FTA + ABM + SEA)	M2: Бронювання (Парето + CZM)	M3: Надійність стріли (LS-Дупа + LEFM)	M4: Управління (ЕКФ + НІЛ + Паде)
Порогові умови операційного ризику → вхід для M2, M3, M4	Оптимальна конфігурація броні і масові обмеження → вхід для M3, M4	Умови безпечної роботи стріли при польових збуреннях	Архітектура управління стійка до РЕБ і комунікаційних затримок
СИНТЕЗУЮЧИЙ ФРЕЙМВОРК: «Мобільний кран як бойова технічна система» — ієрархічна оптимізація конкуруючих параметрів			

Р и с . 1. Структура дослідницької програми і внутрішні зв'язки між модулями

(НІЛ) симуляцію. Методи: ЕКФ (Extended Kalman Filter – розширений фільтр Калмана) для сенсорного злиття, частотний аналіз стійкості, MATLAB Simulink / Simscape Multibody. Цільовий журнал: Automation in Construction (Elsevier, Q1) або Journal of Field Robotics (Wiley, Q1).

НАУКОВА НОВИЗНА І ПРАКТИЧНА ЗНАЧУЩІСТЬ

Наукова новизна очікуваних результатів дослідження може бути визначена такими позиціями:

- вперше буде розроблено аналітичну модель умовної ймовірності ураження мобільного крана від FPV-БПЛА як функції від кінематичних і конструктивних параметрів системи, придатну для кількісного оцінювання операційного ризику кранових операцій у прифронтовій зоні;
- вперше буде побудовано Парето-фронт «рівень захисту STANAG 4569 – вантажний момент крана», що фіксує кількісну залежність між основною функціональною характеристикою підйомної машини і її захисними властивостями;
- набуде подальшого розвитку методологія структурно-динамічного аналізу телескопічних стрілових систем через введення у модель навантаження класу «прифронтового» збурення, що враховує комбінацію підйомного, ударного і вибухового впливів;
- набудуть подальшого розвитку наукові дослідження в галузі GPS-незалежного позиціонування рухомих вантажів через обґрунтування архітектури сенсорного злиття і встановлення порогових параметрів затримки для збереження стійкості управління;
- вперше буде сформовано системний фреймворк опису мобільного крана як бойової технічної системи з ієрархічно організованою множиною конкуруючих цільових функцій.

Практична значущість результатів охоплює три рівні: (1) рівень проектування – технічні вимоги до ретрофітного бронювання кабін КТА-серії як основа для ДКР (дослідно-конструкторських робіт); (2) рівень оперативного планування – кількісні порогові умови безпечної виконання кранових операцій поблизу лінії зіткнення, придатні для інтеграції до бойових статутів і методичних настанов; (3) рівень стандартизації НАТО – системний фреймворк як внесок у розвиток стандартів STAN AG, що регламентують застосування інженерної техніки в умовах загрози БПЛА, використовуваних країнами-партнерами.

ОБМЕЖЕННЯ І ВІДКРИТІ ПИТАННЯ

Дослідницька програма несе три явні обмеження, що необхідно зафіксувати для збереження методологічної чесності.

По-перше, верифікаційне обмеження: найбільш критичні параметри моделей (реальна P(kill) крана від FPV, дані про втрати операторів конкретних класів техніки) є або частково закритими, або доступними лише через OSINT-реконструкцію з відомою неповнотою. Це вимагає сценарного аналізу чутливості у кожному модулі.

По-друге, обмеження узагальнюваності: КТА-серія на шасі КрАЗ є специфічним зразком техніки ЗСУ, і результати окремих модулів безпосередньо застосовні до цього класу. Перенесення висновків на All-Terrain крани Liebherr G-LTM або Grove GMK4060HC потребує окремої параметризації, хоча методологічний фреймворк є класово-незалежним.

По-третє, темп старіння: БПЛА-загрози еволюціонують швидше, ніж академічний цикл публікацій. Результати M1 і M4 мають бути зпроектовані як оновлювані бази параметрів, а не одноразові знімки технологічного стану.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз виявив системний розрив між академічними досягненнями у чотирьох профільних дисциплінах і відсутністю синтезуючого підходу до опису мобільного крана як бойової системи. П'ять сформульованих наукових протиріч не є ізольованими: вони утворюють ієрархічну структуру, де операційний ризик ураження є вершиною ієрархії, а структурна надійність стріли – її основою. Запропонована чотирьохмодульна дослідницька програма є першою формалізованою спробою інтегрувати ці рівні в єдину систему з кількісно визначеними конкуруючими параметрами.

Ключовою методологічною тезою статті є теза про те, що між поняттями «підйомна машина» і «бойова система» є не просто контекстуальна відмінність, а принципова системна різниця у наборі цільових функцій, обмежень і режимів навантаження. Академічне поле, яке не має інструментарію для опису цієї різниці, неминуче продукуватиме рішення, оптимальні для мирного часу і субоптимальні або небезпечні для умов бойових дій. Запропонована дослідницька програма є кроком до усунення цього розриву.

Пріоритетним для практичного впровадження є перший модуль – встановлення кількісних порогових умов безпечної виконання кранових операцій, – оскільки він надає операційним командирам формально обґрунтований інструмент для ухвалення рішень щодо розгортання техніки, що нині спирається виключно на тактичне чуття і неформальний досвід.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Drone warfare in Ukraine: FPV drones account for over 65 % of armored vehicle losses. Defence Ukraine. 2025. URL: <https://www.defenceukraine.com/en/insights/fpv-drones-ukraine-war-analysis/>
2. Structural optimization of the telescopic boom of a certain type of truck-mounted crane. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 548—549. Pp. 383—388. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.383>.
3. Reliability-based design optimization for the lattice boom of crawler crane [team of authors]. *Structures*. 2020. Vol. 28. Pp. 2315—2327. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.061>.
4. Multi-Objective Reliability Optimization of Telescopic Boom for Special Vehicles Based on RSM-RBFNN Hybrid Surrogate Model. *Processes*. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 3811. <https://doi.org/10.3390/pr13123811>.
5. Advanced Composite Armor Protection Systems for Military Vehicles: Design Methodology, Ballistic Testing, and Comparison. *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. Art. 110486. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110486>.
6. Comprehensive Evaluation of Layered Composite Protection Performance for Light Armored Vehicles. *J. of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34. Pp. 28643—28660. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11553-3>.
7. Onboard MuJoCo-based Model Predictive Control for Shipboard Crane with Double-Pendulum Sway Suppression. *arXiv*. 2025. arXiv: 2603.16407.
8. Data-driven Modeling and Adaptive Predictive Anti-swing Control of Overhead Cranes. *International J. of Control, Automation, and Systems*. 2022. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/s12555-022-0025-8>.
9. Neural Network-based Robust Anti-sway Control of an Industrial Crane Subjected to Hoisting Dynamics. *Intern. J. of Control, Automation, and Systems*. 2021. Vol. 19. No. 5. Pp. 1953—1961. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0333-9>.
10. STANAG 4569 AEP-55 Ed. 4. Protection Levels For Occupants Of Armoured Vehicles. NATO Standardization Office. 2022.
11. Autonomous Robotic Bridging / US Army SBIR Program. 2025.
12. Beyond the Gauntlet: Drone Dominance and the Lessons of Ukraine's FPV War. *Inside Unmanned Systems*. 2025. URL: <https://insideunmannedsystems.com>.
13. Networked for War: Lessons from Ukraine's Ground Robots. *Modern War Institute at West Point*. 2025. URL: <https://mwi.westpoint.edu>.
14. Liebherr armoured military cranes G-LTM 1090-4.2 and G-BKF. Liebherr-Werk Ehingen GmbH. 2024. URL: <https://www.liebherr.com/en-us/mobile-and-crawler-cranes/mobile-cranes/military-cranes-4407393>.
15. Технічні характеристики КТА-25 / ДАК. Дрогобицький завод автомобільних кранів. 2024. URL: <https://dak.com.ua>.
16. Estimation of Damage Probability of Combat Vehicle Components Based on Modeling and Simulation. *J. of Mechanical Science and Technology*. 2020. Vol. 34. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1224-y>.
17. Reliability-Based Topology Optimization of Large-Tonnage Crane Boom Head With Stress Constraint. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. P. C.* 2024. <https://doi.org/10.1177/09544062241228983>.
18. Grove GMK4060HC All-Terrain Crane for U.S. Army. *Heavy Equipment Guide*. 2020. <https://www.heavyequipmentguide.ca/article/34061>.
19. US Army Experiments With Autonomous Boat for River Crossing (MSPIX 25). *Janes*. 2025. URL: <https://www.janes.com>.
20. Optimization Design of Curved Outrigger Structure Based on Buckling Analysis and Multi-Island Genetic Algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13. <https://doi.org/10.1177/00368504211023277>.

REFERENCES

1. Drone warfare in Ukraine: FPV drones account for over 65 % of armored vehicle losses. Defence Ukraine. 2025. URL: <https://www.defenceukraine.com/en/insights/fpv-drones-ukraine-war-analysis/>
2. Structural optimization of the telescopic boom of a certain type of truck-mounted crane. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 548—549. Pp. 383—388. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.383>.
3. Reliability-based design optimization for the lattice boom of crawler crane [team of authors]. *Structures*. 2020. Vol. 28. Pp. 2315—2327. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.061>.
4. Multi-Objective Reliability Optimization of Telescopic Boom for Special Vehicles Based on RSM-RBFNN Hybrid Surrogate Model. *Processes*. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 3811. <https://doi.org/10.3390/pr13123811>.
5. Advanced Composite Armor Protection Systems for Military Vehicles: Design Methodology, Ballistic Testing, and Comparison. *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. Art. 110486. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110486>.
6. Comprehensive Evaluation of Layered Composite Protection Performance for Light Armored Vehicles. *J. of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34. Pp. 28643—28660. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11553-3>.
7. Onboard MuJoCo-based Model Predictive Control for Shipboard Crane with Double-Pendulum Sway Suppression. *arXiv*. 2025. arXiv: 2603.16407.
8. Data-driven Modeling and Adaptive Predictive Anti-swing Control of Overhead Cranes. *International J. of Control, Automation, and Systems*. 2022. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/s12555-022-0025-8>.
9. Neural Network-based Robust Anti-sway Control of an Industrial Crane Subjected to Hoisting Dynamics. *Intern. J. of Control, Automation, and Systems*. 2021. Vol. 19. No. 5. Pp. 1953—1961. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0333-9>.
10. STANAG 4569 AEP-55 Ed. 4. Protection Levels For Occupants Of Armoured Vehicles. NATO Standardization Office. 2022.
11. Autonomous Robotic Bridging / US Army SBIR Program. 2025.
12. Beyond the Gauntlet: Drone Dominance and the Lessons of Ukraine's FPV War. *Inside Unmanned Systems*. 2025. URL: <https://insideunmannedsystems.com>.
13. Networked for War: Lessons from Ukraine's Ground Robots. *Modern War Institute at West Point*. 2025. URL: <https://mwi.westpoint.edu>.

14. Liebherr armoured military cranes G-LTM 1090-4.2 and G-BKF. Liebherr-Werk Ehingen GmbH. 2024. URL: <https://www.liebherr.com/en-us/mobile-and-crawler-cranes/mobile-cranes/military-cranes-4407393>.
15. “Tekhnichni kharakterystyky KTA-25 / DAK. Drohobyskyi zavod avtomobilnykh kraniv” [Technical characteristics KTA-25 / DAK. Drohobych Truck Crane Plant]. 2024. URL: <https://dak.com.ua>.
16. Estimation of Damage Probability of Combat Vehicle Components Based on Modeling and Simulation. J. of Mechanical Science and Technology. 2020. Vol. 34. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1224-y>.
17. Reliability-Based Topology Optimization of Large-Tonnage Crane Boom Head With Stress Constraint. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. P. C. 2024. <https://doi.org/10.1177/09544062241228983>.
18. Grove GMK4060HC All-Terrain Crane for U.S. Army. Heavy Equipment Guide. 2020. <https://www.heavyequipmentguide.ca/article/34061>.
19. US Army Experiments With Autonomous Boat for River Crossing (MSPIX 25). Janes. 2025. URL: <https://www.janes.com>.
20. Optimization Design of Curved Outrigger Structure Based on Buckling Analysis and Multi-Island Genetic Algorithm. Advances in Mechanical Engineering. 2021. Vol. 13. <https://doi.org/10.1177/00368504211023277>.

Zalisko I.I., Himber S.M.

**SYSTEM ANALYSIS AND OPTIMIZATION
METHODOLOGY FOR MOBILE CRANES
ON TRUCK CHASSIS IN ACTIVE COMBAT
CONDITIONS: STRUCTURAL RELIABILITY,
BALLISTIC PROTECTION AND SURVIVABILITY**

This article demonstrates the relevance and scientific and practical significance of a new research direction: the systematic analysis of mobile cranes mounted on truck chassis as combat technical systems in a UAV-saturated combat environment. Based on an analysis of four thematic clusters of the reviewed literature, a systemic gap has been identified between academic achievements in the fields of structural mechanics, ballistic materials science, control theory, and military analytics, and the lack of a synthesizing interdisciplinary approach to describing the crane as a unified combat system. Five key scientific contradictions were identified, forming the research problem of the study. Based on the experience of the armed conflict in Ukraine in 2022–2026, the transformation of threats to unarmored engineering vehicles posed by FPV-UAVs is characterized,

and the fundamental insolubility of this problem within the framework of any single discipline is demonstrated. A four-module research program structure is proposed, defining scientific tasks, methods, and target journals for publications. The article substantiates the relevance and issues of the new research direction.

Keywords: mobile crane, combat vehicle system, ballistic protection, STANAG 4569, FPV UAV, structural reliability, telescopic boom, remote control, survivability, engineering equipment.

Відомості про авторів:

Заліско Ігор Ігорович

кандидат технічних наук
генеральний директор
Дрогобицький завод автомобільних кранів
м. Дрогобич, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8353-9524>
e-mail: dak@dak.com.ua

Гімбер Сергій Миколайович

інженер, начальник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7616-3944>
e-mail: serhumber@ukr.net

Information about the authors:

Zalisko Ihor

Candidate of Technical Sciences
CEO of the Drohobych Truck Crane Plant
Drohobych, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8353-9524>
e-mail: dak@dak.com.ua

Himber Serhii

Engineer
Head of the Research and Development Department for Scientific Research of Armament and Military Equipment of the Support Forces
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7616-3944>
e-mail: serhumber@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 14.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

Шановні читачі!!!

Доводимо до Вашого відома, що в нашому видавництві відбулися суттєві зміни щодо оформлення та подання статей до нашого видання.

Подача статей відбувається тльки через сайт журналу.

По-перше, відкрито сайт журналу, на якому більш детально викладені вимоги до наших публікацій. Ознайомитися можна за посиланням

[https:// journal.cndiovt.com.ua](https://journal.cndiovt.com.ua)

По-друге, звертайтеся до редакції журналу за телефонами: **+38 (044) 520-12-84,**

+38 (044) 271-09-66

+38 (067) 110-74-43

Глазкова Світлана Валентинівна

E-mail: cndi_ovt@ukr.net.

Розглянуто та схвалено до друку науково-технічною радою ЦНДІ ОБТ ЗС України
(протокол № 5 від 21.05.2026)

Підписано до друку 30.06.2026

Формат 60 x 84 1/8. Гарнітура Times New Roman.

Ум. друк. арк. 13,02. Наклад 250 прим. Зам. 401.

Надруковано в ТОВ «Видавничий дім “Бук-Друк”»

Україна, м. Житомир, вул. Мала Бердичівська, 17А

Тел.: +38063 101 22 33

Свідоцтво серія ДК №7412 від 27.07.2021 р.

Reviewed and approved for publication by Scientific and Technical Council CSRI AME AF of Ukraine
(record No.5 of 21.05.26)

Signed for print on 30.06.2026

Conditional printed sheets 13.02. Format 60x84 1/8.

Circulation 250 copies. order number 401.

Published by «Publishing house “Book-Druk”» LLC

Ukraine, Zhytomyr, street Mala Berdychivska, 17A

Phone: +38063 101 22 33

Certificate DK № 7412 dated 27.07.2021.