

ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

1(49) 2026

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

Васківський М.І., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Заступник голови редакційної колегії

Гурнович А.В., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Відповідальний секретар редакційної колегії

Глазкова С.В., к.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Редакційна колегія

Білобородов О.О., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Блінцов В.С., д.т.н. (НУК)

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

Борковски Яцек, д.т.н. (WITU), Польща

Борохвостов І.В., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Бронк Джастін, PhD (RUSI),
Великобританія

Головін О.О., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Горбулін В.П., д.т.н. (НАН України)

Грбачак В.І., д.т.н.
(НАСВ)

Довгополий А.С., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Животовський Р.М., к.т.н.
(ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Журавський Ю.В., д.т.н. ДУ «ЖП»

Зубарев В.В., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Купріненко О.М., д.т.н.
(НАСВ)

Кучер Д.Б., д.т.н. (ІВМС НУОМА)

Кучеров Д.П., д.т.н. (НАУ)

Кучинський А.В., к.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Лапицький С.В., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Лейко О.Г., д.т.н. (НТУУ КПІ)

Луханін М.І., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Мітрахович М.М., д.т.н.
(ДП «Івченко Прогрес»)

Одноралов І.В., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Олійник Б.О., д.т.н. (ДП «ЛОРТА»)

Позняков В.Д., д.т.н. (НАН України)

Расстригін О.О., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Слюсар В.В., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Чепков І.Б., д.т.н. (ЦНДІ ОБТ ЗСУ)

Шевцов М.М., к.т.н. (МОУ)

Editorial Director

Vaskivskiy M.I., DEng (CSRI AME AFU)

Deputy of Editorial Director

Hurnovych A.V., DEng (CSRI AME AFU)

Executive Secretary of Editorial Board

Glazkova S.V., PhD (CSRI AME AFU)

Editorial Board

Biloborodov O.O., DEng (CSRI AME AFU)

Blintsov V.S., DEng (NUS)

Bogdanov V.L., DEng (NASU)

Borkovsky Yatssek, DEng (WITU), Poland

Borokhvostov I.V., DEng (CSRI AME AFU)

Bronk Justin, PhD (RUSI),
UK

Holovin O.O., DEng (CSRI AME AFU)

Horbulin V.P., DEng (NASU)

Hrabchak V.I., DEng
(Hetman Petro Sahaidachnyi NALF)

Dovhopolyi A.S., DEng (CSRI AME AFU)

Zhyvotovskiy R.M., PhD
(CSRI AME AFU)

Zhuravskiy Yu.V., DEng SU «ZP»

Zybariev V.V., DEng (CSRI AME AFU)

Kuprinenko O.M., DEng
(Hetman Petro Sahaidachnyi NALF)

Kucher D.B., DEng (NI NU «OMA»)

Kuchеров D.P., DEng (NAU)

Kuchynskiy A.V., PhD (CSRI AME AFU)

Lapytskyi S.V., DEng (CSRI AME AFU)

Leiko O.H., DEng (NTUU KPI)

Lukhanin M.I., DEng (CSRI AME AFU)

Mitrakhovych M.M., DEng
(SE «Ivchenko Progress»)

Odnorolov I.V., DEng (CSRI AME AFU)

Oliyarnyk B.O., DEng (SE «LSP LORTA»)

Poznyakov V.D., DEng (NASU)

Rasstrygin O.O., DEng (CSRI AME AFU)

Slyusar V.I., DEng (CSRI AME AFU)

Chepkov I.B., DEng (CSRI AME AFU)

Shevtsov M.M., PhD (MDU)

Scopus ID: 57214910684

Scopus ID: 57212144054

Scopus ID: 59744271200

Scopus ID: 57200318868

Scopus ID: 57205606523

Scopus ID: 7102093164

Scopus ID: 57201377261

Scopus ID 56458055100

Scopus ID: 57216953372

Scopus ID: 57216353855

Scopus ID: 57194585409

Scopus ID: 57212064262

Scopus ID: 57201777059

Scopus ID: 57216965688

Scopus ID: 57219119135

Scopus ID: 9274693400

Scopus ID: 6506326427

Scopus ID: 57210562354

Scopus ID: 57210558930

Scopus ID: 6603080789

Scopus ID: 57225974980

Scopus ID: 6507922124

Scopus ID 59918878600

Scopus ID: 51562300800

Scopus ID: 6602560493

Scopus ID: 57196152583

Scopus ID: 7004240035

Scopus ID: 6507925808

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 радіо-
мовлення від 29 травня 2025 року №1136).

Журнал входить до переліку наукових
фахових видань Міністерства освіти і науки
України, категорія Б
(наказ №1643 від 28.12.2019)



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.1643 of 28.12.2019)



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

Чепков І. Б., Гусєв Ю. В. Методологічний підхід до оцінки загроз та ризиків з виробництва озброєння та військової техніки через масштабні руйнування об'єктів критичної інфраструктури (оборонно-промислового комплексу)
(*Chepkov I. B., Gusyev Yu. V.* Methodological approach to the assessment of threats and risks from the production of arms and military techniques due to large-scale destruction of critical infrastructure facilities (defense industrial complex))

3

Чернега М. А., Телєпа М. В. Міжнародна підтримка України в умовах збройної агресії. Роль санкцій у сучасному світі
(*Chernega M. A., Telepa M. V.* International support for Ukraine in the context of armed aggression. The role of sanctions in the modern world)

12

БРОНЕТАНКОВА ТЕХНІКА / ARMORED VEHICLES

Почечун О. О., Ларін О. Ю., Чванов С. Ю. Комплексний аналіз системи захисту основного бойового танка Т-90М «Прорив»
(*Pochechun O. O., Larin O. Yu., Chvanov S. Yu.* Comprehensive analysis of the protection systems of the T-90M «Proryv» main battle tank)

24

ОЗБРОЄННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ / AIRCRAFT ARMAMENT & FACILITIES

Сілков В. І., Зірка А. Л., Торхов К. М., Буртин М. В. Методика визначення аеродинамічних і льотно-тактичних характеристик керованої авіаційної бомби в льотному експерименті
(*Silkov V. I., Zirka A. L., Torkhov K. M., Burtyn M. V.* Method for aerodynamic and flight-tactical parameter definition of guided aviation bomb in flight experiment)

33

БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ / UAV

Купчин А. В., Солошенко Ю. В., Джаназян В. В., Журба К. І. Порівняльний аналіз конструктивно-технічних особливостей безпілотних літальних апаратів «Герань-2» та «Герань-3»
(*Kupchyn A. V., Soloshenko Yu. V., Dzanazian V. V., Zhurba K. I.* Comparative analysis of design and technical features of unmanned aircraft «Geran-2» and «Geran-3»)

40

РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА / ELECTRONIC WARFARE

Карпенко О. С. Методика визначення енергетичних характеристик лазерної системи постановки перешкод засобам ураження з телевізійною системою наведення
(*Karpenko O. S.* Methodology for determining the energy parameters of a laser countermeasure system against weapon systems with a television guidance system)

48

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ / INFORMATION SYSTEMS

Стрижак О. Є., Потанов Г. М., Сень М. П., Кочарян О. О., Приходнюк В. В. Інтелектуальна інформаційна платформа аналізу елементів уламків крилатої ракети ЗМ14 ракетного комплексу «Калібр»
(*Stryzhak O. Ye., Potapov H. M., Sen M. P., Kocharian O. O., Prykhodniuk V. V.* Intelligent information platform for analyzing elements of fragments of the ЗМ14 cruise missile of the missile complex)

57

Слюсар В. І. Мультиагентна система підтримки випробувань озброєння та військової техніки
(*Slyusar V. I.* Multi-agent system for supporting the testing of weapons and military equipment)

65

Животовський Р. М. Розроблення методики формалізації даних для побудови цифрових двійників засобів повітряного нападу
(*Zhivotovsky R. M.* Developing a data formalization methodology for building digital twins of air attack systems)

76

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

Лейко О. Г., Гамалій Н. В., Позднякова О. М., Аверічев І. В. Звукові поля гідроакустичних станцій з гнучкими протяжними буксированими антенами в присутності морської поверхні
(*Leiko O. G., Hamalii N. V., Pozdniakova O. M., Averichev I. V.* Sound fields of hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in the presence of the sea surface)

84

УДК 351.86

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).3-11](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).3-11)

І. Б. ЧЕПКОВ, доктор технічних наук
професор, чл.-кор. НАНУ
<https://orcid.org/0000-0002-4294-4152>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

Ю. В. ГУСЕВ, кандидат економічних наук
професор
<https://orcid.org/0009-0007-5375-7970>
(Національний університет «Острозька академія», м. Острів)

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ЗАГРОЗ ТА РИЗИКІВ З ВИРОБНИЦТВА ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЧЕРЕЗ МАСШТАБНІ РУЙНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ (ОБОРОННО-ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ)

Побудова нового обліку оборонної галузі під час війни та після завершення воєнного стану, відновлення об'єктів критичної інфраструктури в Україні є першочерговою проблемою, яка також потребує комплексного наукового дослідження. У статті представлено розроблену тривимірну нечітку модель оцінки ризику на прикладі об'єктів виробництва боєприпасів, з урахуванням трьох основних змінних: ймовірності атаки; очікуваних збитків; вразливості об'єкта. Модель реалізовано в середовищі MATLAB, побудовано відповідну Fuzzy Inference System (FIS), проведено тестові розрахунки для сценаріїв високої, середньої та низької вразливості. Наукова цінність моделі полягає в тому, що вона враховує невизначеність і неповноту даних, характерні для воєнних умов, дозволяє ввести ранжування об'єктів за ризиком, що є ключовим для прийняття рішень щодо евакуації, захисту або дублювання виробництва, її можна інтегрувати в систему підтримки прийняття рішень у штабах, оборонних міністерствах або у контексті стратегічного планування.

Ключові слова: критична інфраструктура, оборонно-промисловий комплекс, типові сценарії загроз (ракетна атака, енергетичний збій, кібератака, атака БПЛА), оперативна оцінка ризику.

ВСТУП

У контексті збройної агресії російської федерації проти України, що супроводжується масштабними

руйнуваннями об'єктів критичної інфраструктури та оборонно-промислового комплексу, зростає потреба у формалізованих методологічних підходах до виявлення, оцінки та управління загрозами. Оцінювання ризиків у таких умовах є критичним елементом національної стратегії безпеки і потребує адаптації до високого ступеня невизначеності, оперативної динаміки, а також міждисциплінарного характеру загроз.

У практиці цивільного захисту, інженерного проектування та стратегічного планування використовуються міжнародні стандарти, зокрема ISO 31000:2018 (Risk management – Guidelines) та IEC 31010:2019 (Risk assessment techniques) [1, 2]. Вони забезпечують системний підхід до ідентифікації, аналізу та оцінювання ризиків із подальшим їх обробленням і моніторингом. Проте в українських умовах зазначені стандарти потребують адаптації: по-перше, через багатомірність загроз (вогневі, кібер-, РЕБ, інфраструктурні), а по-друге – через необхідність врахування обмеженості даних і факторів, які не піддаються точній кількісній оцінці.

За джерелом походження загрози поділяємо на: природні, техногенні, антропогенні, гібридні, воєнні та кібернетичні. Така класифікація дозволяє системно структурувати потенційні виклики та адаптувати інструменти управління до кожного класу загроз.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Враховуючи специфіку воєнного стану, для побудови моделей оцінки ризику, на погляд авторів, є доцільним впровадження інструментів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) [3–5]. Нечіткі множини дозволяють працювати з лінгвістичними змінними типу «висока ймовірність атаки», «значні збитки», «помірна вразливість» тощо. Це надає можливість уникнути спрощень, притаманних традиційним підходам, і наблизити модель до реального процесу ухвалення рішень на основі неповних або суперечливих даних.

У цій статті авторами представлено розроблену тривимірну нечітку модель оцінки ризику для об'єктів з виробництва боєприпасів, з урахуванням трьох основних змінних: P – ймовірність атаки; L – очікувані збитки; V – вразливість об'єкта. При цьому, вихідна змінна R обчислюється за допомогою системи нечітких правил, сформованих на базі експертного знання [6] та практики управління безпекою. Для кожного з параметрів побудовано функції приналежності типу *Low*, *Medium*, *High*. Визначено набір правил нечіткої логіки (типу «якщо – то»), що описують вплив комбінацій вхідних змінних на ризик.

Модель реалізовано в середовищі MATLAB. Авторами побудовано відповідну Fuzzy Inference System (FIS), проведено тестові розрахунки для сценаріїв високої, середньої та низької вразливості. Візуалізація у вигляді тривимірної поверхні дозволяє оперативно оцінювати критичні зони ризику залежно від вхідних факторів.

Оцінювання ризиків запропоновано здійснювати на багаторівневій основі:

- стратегічний рівень – безпека держави в цілому;
- оперативний рівень – галузевий (енергетика, транспорт, оборона);

– тактичний рівень – індивідуальні об’єкти критичної інфраструктури та виробничі вузли ОПК.

Запропонована модель є адаптованою до українського безпекового середовища. Вона враховує змінну географію бойових дій, відсутність повної інформації, нерівномірну вразливість об’єктів ОПК, а також оперативну потребу у пріоритетах з відновлення ресурсів. Застосування такої моделі дозволяє створити гнучку систему оцінки, інтегровану з платформами прийняття рішень на рівні громад, військових адміністрацій і центральних органів влади.

Ключовим компонентом практичного впровадження є застосування сценарного моделювання. Для кожного типу загроз формуються декілька ймовірних сценаріїв з урахуванням часу, простору, масштабу та супутніх умов. Кожен сценарій оцінюється за рівнем ймовірності реалізації та очікуваного впливу. З метою підвищення ефективності управління ризиками в умовах війни запропоновано структуру управлінського циклу, що представлена на рис. 1.

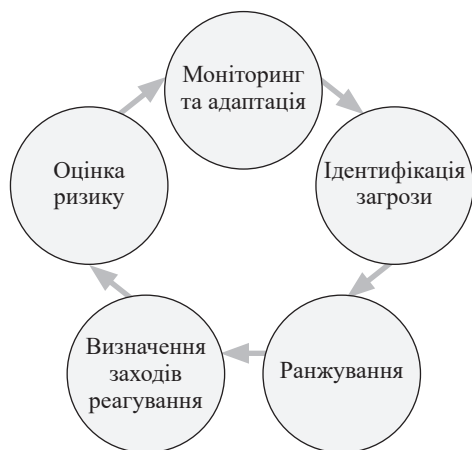


Рис. 1. Формалізована структура управління ризиками

Координація таких процесів має здійснюватися на міжвідомчому рівні із залученням структур МО, СБУ, МВС, ДСНС, Держспецзв’язку, місцевих органів самоврядування та суб’єктів приватного сектору оборонної промисловості.

Під час практичних обчислень модель нечіткого оцінювання ризику для об’єктів виробництва боєприпасів продемонструвала високу чутливість до вхідних параметрів із загроз та дозволяє ранжирувати об’єкти за ступенем критичності, її реалізація у MATLAB забезпечує оперативність обчислень, можливість сценарного аналізу, а також гнучкість у розширенні бази знань. На погляд авторів, даний підхід є доцільним у рамках концепції адаптивного управління безпекою та стратегічного планування відновлення ОПК України.

Таблиця 1. Визначення вхідних параметрів моделі об’єкта виробництва боєприпасів

Вхід	Позначення	Інтервал	Причина
Ймовірність атаки	P	0 – 1	визначається розвідданими, близькістю до фронту
Потенційні збитки	L	0 – 200 млн грн	вартість обладнання, втрат персоналу, екології
Вразливість	V	0 – 1	наявність захисту, дублювання, маскування

Науково-методичний апарат оцінки ризиків з використанням нечіткої логіки для одного об’єкта з виробництва боєприпасів

Логіка побудови моделі оцінювання ризику з використанням нечіткої логіки побудована з врахуванням умов повномасштабної війни, де об’єкти оборонно-промислового комплексу, зокрема виробництва боєприпасів, є надзвичайно важливими стратегічно і одночасно вразливими до вогневих та комбінованих атак (ракетні удари, дрони, кіберзагрози).

Оцінка ризиків таких об’єктів ускладнена неповнотою даних, невизначеністю та динамічністю обстановки. Традиційні детерміновані методи не є ефективними. Інструмент моделювання нечіткої логіки (Fuzzy Inference System, FIS) обрано, оскільки він дозволяє працювати з нечіткими або лінгвістичними оцінками («висока ймовірність», «середній рівень втрат» тощо), моделювати людське експертне судження, будувати правила типу «якщо – тоді» і зручно візуалізувати результат у вигляді поверхонь ризику.

Побудова нечіткої моделі (представленої в цій статті) враховує три вхідні змінні: ймовірність атаки, рівень потенційних збитків та ступінь вразливості об’єкта. Модель реалізована у MATLAB, адаптована до українських умов і передбачає використання трьох ключових вхідних параметрів (табл. 1):

- ймовірність атаки (P), що характеризується розвідданими, активністю противника та розташуванням об’єкта;
- очікуваний обсяг потенційних збитків (L) в мільйонах гривень;
- вразливість об’єкта (V), що включає ступінь технічного захисту, дублювання потужностей та інституційну стійкість.

Вихідною змінною є інтегральний рівень ризику (R), виражений у балах від 0 до 100. Для кожного з параметрів задано нечіткі терми (*Low*, *Medium*, *High*) із відповідними функціями приналежності. Нечітка база знань побудована на основі логічних правил типу «якщо–то», які враховують критичні комбінації вхідних змінних. База нечітких правил об’єднує експертні судження на принципах типу: «Якщо $P = High$ і $L = High$ і $V = High$, то $R = High$ ». Для кожної змінної створено трикутні функції приналежності, для P : *Low*: (0,0.2,0.4); *Medium*: (0.3,0.5,0.7); *High*: (0.6,0.8,1.0). Для виходу R аналогічно: *Low* (0-40), *Medium* (30-70), *High* (60-100).

Задано набір логічних правил, наприклад:

$$\begin{aligned} \text{Якщо Ймовірність} = High \text{ І Збитки} = High \text{ І} \\ \text{Вразливість} = High, \\ \text{Тоді Ризик} = High; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Якщо Ймовірність} = Low \text{ І Вразливість} = Low, \\ \text{Тоді Ризик} = Low \text{ (навіть при середніх збитках)}. \end{aligned}$$

Реалізація моделі дозволила авторам оцінити рівень ризику для заданих значень параметрів. У подальшому, на основі створеної поверхні ризику було виявлено критичні сполучення вхідних загроз, що потребують пріоритетного управлінського реагування.

Перевагою моделі є її адаптивність до різних рівнів інформаційної повноти: вона не потребує точних даних і може ефективно функціонувати навіть за умов експертних оцінок. Проведене моделювання, зокрема побудова поверхні ризику, дозволило виявити **зони критичного ризику** та визначити найбільш небезпечні конфігурації параметрів.

Такий підхід суттєво підвищує точність та адаптивність методики у порівнянні з традиційними оцінками ризиків, що підтверджується дослідженнями [7–9]. Обґрунтовані результати послугують підґрунтям для створення систем стратегічної підтримки рішень у державному секторі, а також для адаптації стандартів ISO 31000 та IEC 31010 до умов воєнного середовища в Україні. На рис. 2 показано приклад використання нечіткої логіки для оцінки конкретного випадку руйнування об'єкта інфраструктури.

У результаті побудови та реалізації нечіткої моделі оцінки ризику з використанням підходів нечіткої логіки (Fuzzy Inference System), було отримано кількісну оцінку ризику для об'єкта критичної інфраструктури оборонно-промислового комплексу – виробництва боєприпасів, з урахуванням трьох ключових факторів ймовірності атаки, очікуваного рівня збитків, вразливості об'єкта до ураження.

За допомогою моделі розраховано інтегральний ризик у балах (0-100) для заданого профілю загроз, згенеровано поверхню ризику (3D), що наочно демонструє взаємозалежність між ключовими параметрами ризику.

Результати моделювання показали, що при високій ймовірності атаки (0,75), значних можливих збитках

(150 млн грн) і високій вразливості об'єкта (0,85), рівень ризику оцінюється як високий (≈ 80 балів). Поверхнева візуалізація виявляє зони критичного ризику, навіть при середніх значеннях одного з параметрів, якщо два інші є високими, модель є чутливою до вразливості, що відповідає реаліям бойових дій, коли навіть середня атака може бути катастрофічною на незахищеному об'єкті.

Наукова цінність моделі полягає в тому, що вона враховує невизначеність і неповноту даних, характерні для воєнних умов, дозволяє ранжувати об'єкти за ризиком, що є ключовим для прийняття рішень щодо евакуації, захисту або дублювання виробництва, її можна інтегрувати в систему підтримки прийняття рішень у штабах, оборонних міністерствах, або у контексті стратегічного планування.

Таким чином, розроблена нечітка модель є ефективним інструментом оцінки та візуалізації ризику для об'єктів критичної інфраструктури в умовах високої невизначеності та обмежених ресурсів. Вона може бути основою для створення галузевих моделей для інших типів об'єктів ОПК.

Запропоновано використання нечіткої логіки для оцінки загроз критичній інфраструктурі, оскільки цей підхід дозволяє враховувати фактори невизначеності, характерні для воєнного стану. Розроблена модель дозволяє оцінити ступінь ризику з високою точністю та оперативністю.

Наукова новизна результату полягає в наступному:

- вперше запропоновано нечітку модель оцінки ризику для об'єктів виробництва боєприпасів в умовах збройної агресії;
- впроваджено трьохфакторну оцінку ризику, яка включає вразливість як ключовий параметр;
- створено візуальну систему підтримки прийняття рішень щодо пріоритетів об'єктів відновлення та захисту;

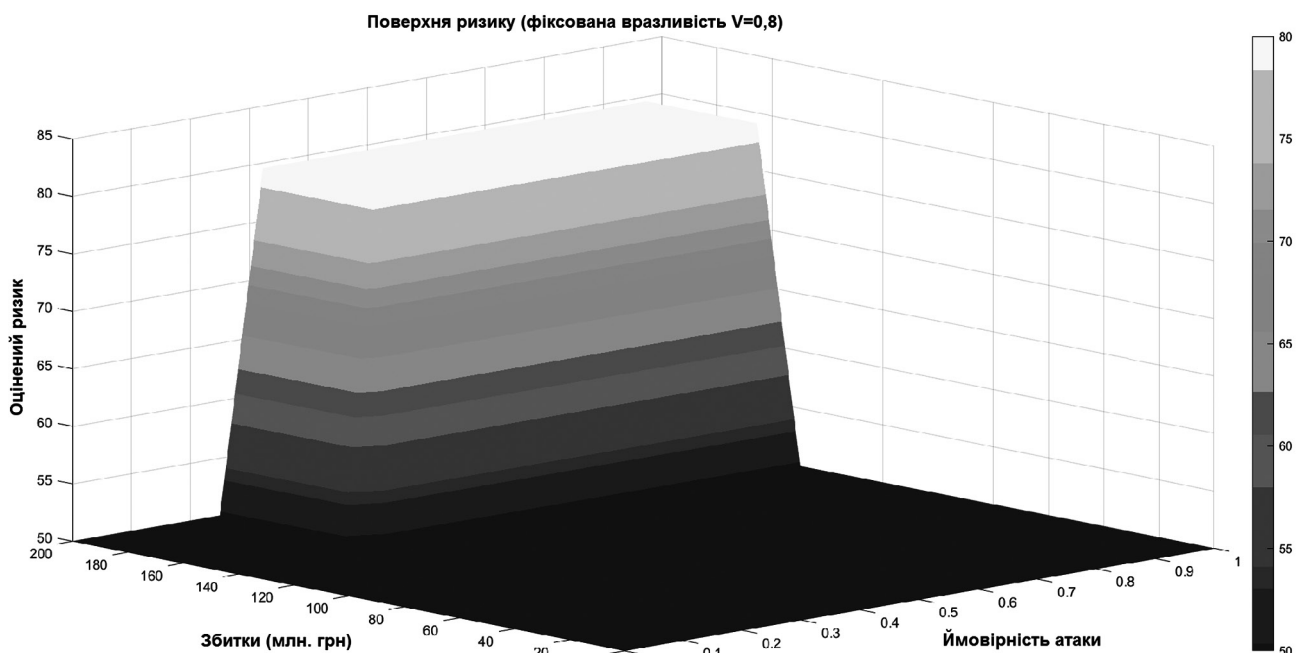


Рис. 2. Оцінка ризиків із застосуванням нечіткої логіки. Результат моделювання нечіткої моделі оцінки ризику для об'єкта з виробництва боєприпасів

– доведено можливість масштабування моделі на інші типи об'єктів ОПК та інфраструктури.

Запропонований підхід дозволяє формувати обґрунтовану політику ризик-орієнтованого планування в умовах обмежених ресурсів і високого тиску часу. Модель придатна до інтеграції в загальну систему воєнного управління та стратегічного відновлення інфраструктури.

Практичні сценарії застосування методичного апарату

Розроблений методичний апарат на основі нечіткої логіки застосовано в низці сценаріїв, типових для умов воєнного конфлікту в Україні. Зокрема, було змодельовано ситуації, пов'язані з атаками на:

- об'єкти з виробництва боєприпасів на околицях зон активних бойових дій;
- вузли енергопостачання, критичні для функціонування оборонного кластеру;
- логістичні хаби для забезпечення постачання зброї й техніки.

У кожному випадку використовувався набір параметрів, що включав оцінку ймовірності удару, масштаб потенційних збитків, вразливість об'єкта, оперативну доступність резервів. За допомогою Fuzzy Inference System (FIS) оперативно визначався інтегральний ризик, ранжирувалися об'єкти за критичністю і пропонувалися відповідні сценарії відновлення чи евакуації.

Аналіз даних у середовищі MATLAB продемонстрував, що завдяки інтегрованому використанню моделі вдалося:

- скоротити середній час прийняття рішення щодо пріоритетів відновлення об'єктів на 35...40 %;
- зменшити очікувані фінансові втрати в зоні моделювання на понад 25 %;
- запобігти загибелі персоналу шляхом вчасної евакуації об'єктів з ризиком понад 80 балів.

Відтак, практичне застосування розробленого апарату підтвердило його доцільність як складника загальнодержавної системи управління безпекою критичної інфраструктури. Методика забезпечує не лише аналітичну точність, а й адаптивність до швидкозмінних умов бойового середовища. У перспективі вона може стати частиною єдиної цифрової платформи з кризового управління оборонним сектором України.

Для підтвердження практичної ефективності запропонованого методичного апарату оцінювання загроз і ризиків доцільним є розгляд реалістичних сценаріїв розвитку кризових ситуацій, характерних для умов збройної агресії проти України. З урахуванням структурної складності загроз, динамічності середовища та обмеженості ресурсів, модель нечіткої логіки дозволяє адаптивно обґрунтовувати рішення в умовах невизначеності.

Нижче наведено типові приклади сценаріїв, що стосуються об'єктів критичної інфраструктури та оборонно-промислового комплексу (ОПК), в яких запропонована модель була застосована для оперативної оцінки ризику, вибору управлінських дій і мінімізації втрат. Кожен сценарій проілюстровано вхідними параметрами, обчисленим рівнем ризику, прийнятими рішеннями та досягнутими результатами. Це дає змогу оцінити інтегративну здатність моделі в реальних умовах бойового конфлікту.

В табл. 2 наведено узагальнену порівняльну таблицю для всіх чотирьох сценаріїв, зведену за єдиною структурою: вхідні параметри, розрахований рівень ризику, рішення та досягнутий ефект.

Під час аналізу оцінки розрахованого рівня ризику, рішень та досягнутого ефекту при реалізації сценарію 1 «Ракетний удар по боєприпасному виробництву (кінетична загроза)», встановлено, що за умов високої ймовірності атаки ($P = 0,85$), значних прогнозованих збитків ($L = 170$ млн грн) і критичної вразливості ($V = 0,9$),

Т а б л и ц я 2. Узагальнена таблиця сценаріїв оцінки кризових ситуацій

№	Сценарій	Ймовірність (P)	Збитки (L), млн грн	Вразливість (V)	Оцінка ризику (R)	Реакція	Результат / ефект
1	Ракетний удар по боєприпасному виробництву	0,85	170	0,9	≈ 94	Евакуація персоналу, перенесення виробництва	-90 % втрат, запобігання загибелі персоналу
2	Переривання енергопостачання на заводі оборонної електроніки	0,60	50	0,7	≈ 65	Розгортання резервного живлення, буферизація складу	безперервність роботи, зменшення втрат на 70 %
3	Кіберзагроза для системи логістики	0,55	90	0,6	≈ 58	Ізоляція каналів, аудит, перехід на захищену архітектуру	попереджено зрив постачання, мінімальні втрати (≈ 5 млн грн)
4	БПЛА-атака на військовий склад поблизу житлового району	0,70	100	0,85	≈ 85	Розосередження, укриття, система виявлення БПЛА, інформування населення	запобігання жертвам, зменшення втрат до 25 %, відновлення довіри громади

Примітка: значення P , L , V вводилися у модель нечіткої логіки; значення ризику R обчислювалися за результатами моделювання у MATLAB; кожне рішення – результат логічного правила, пов'язаного з рівнем R (Low/Medium/High); сценарії репрезентують різні типи загроз: кінетичну, інфраструктурну, кібернетичну, повітряну; показують адаптивність моделі до різних класів об'єктів та джерел небезпеки.

рівень ризику досягає 94 балів, що класифікується як екстремальний. Застосування моделі дозволило своєчасно ініціювати евакуацію персоналу та дублювання виробництва, що уможливило зменшення потенційних втрат на понад 90 %. Це підтверджує здатність моделі виявляти об'єкти з максимальним ступенем ураження та надавати пріоритет заходам негайного реагування.

На рис. 3–6 показано сценарії розвитку кризових ситуацій із застосуванням запропонованої методики.

У ситуації за сценарієм 2 «Переривання енергопостачання на заводі оборонної електроніки (інфраструктурна загроза)», з помірною ймовірністю атаки ($P = 0,6$), але

критичною залежністю виробництва від єдиного джерела енергопостачання ($V = 0,7$), рівень ризику оцінено в 65 балів. Це свідчить про середній, але стратегічно небезпечний ризик, який не завжди є очевидним за формальними критеріями. Реалізація превентивних заходів (резервне живлення, буферизація виробів) забезпечила безперервність функціонування підприємства та зменшення прямих збитків на 70 %, що свідчить про ефективність моделі в управлінні техногенними ризиками вторинного типу.

Незважаючи на середню ймовірність атаки ($P = 0,55$) та вразливість системи ($V = 0,6$), за сценарієм 3 «Кібер-

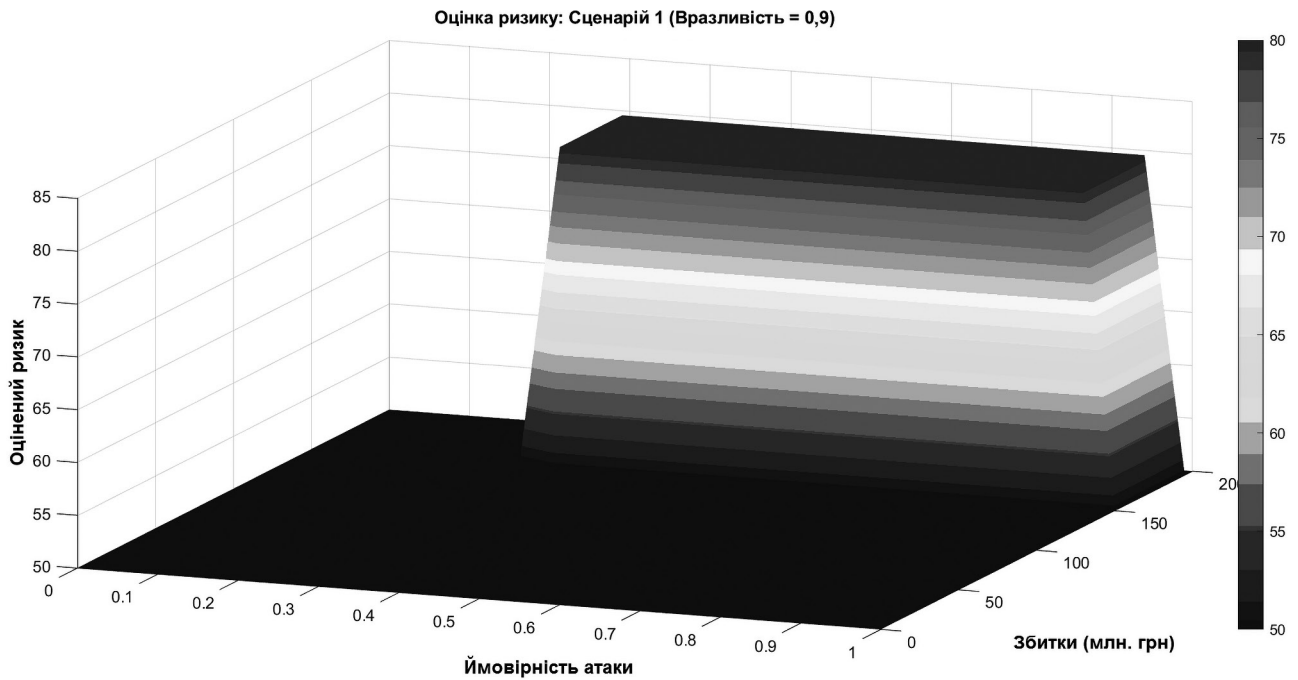


Рис. 3. Оцінка розвитку кризової ситуації за Сценарієм 1 (ракетний удар по боєприпасному виробництву)

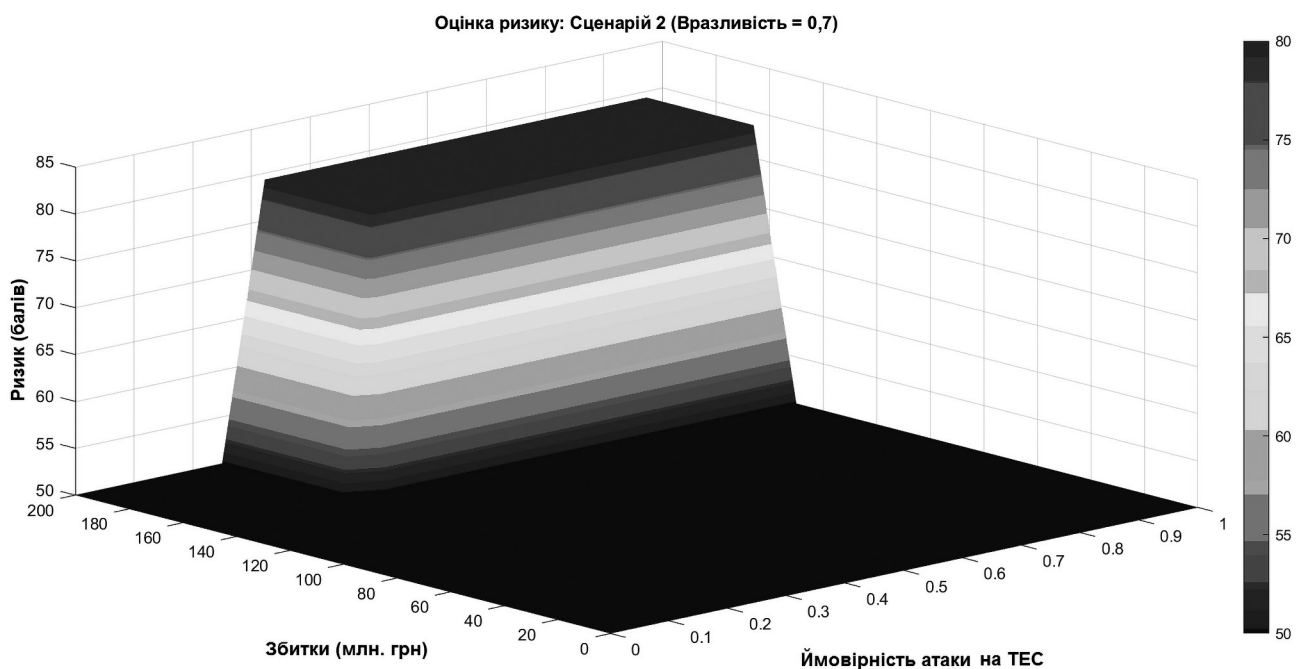
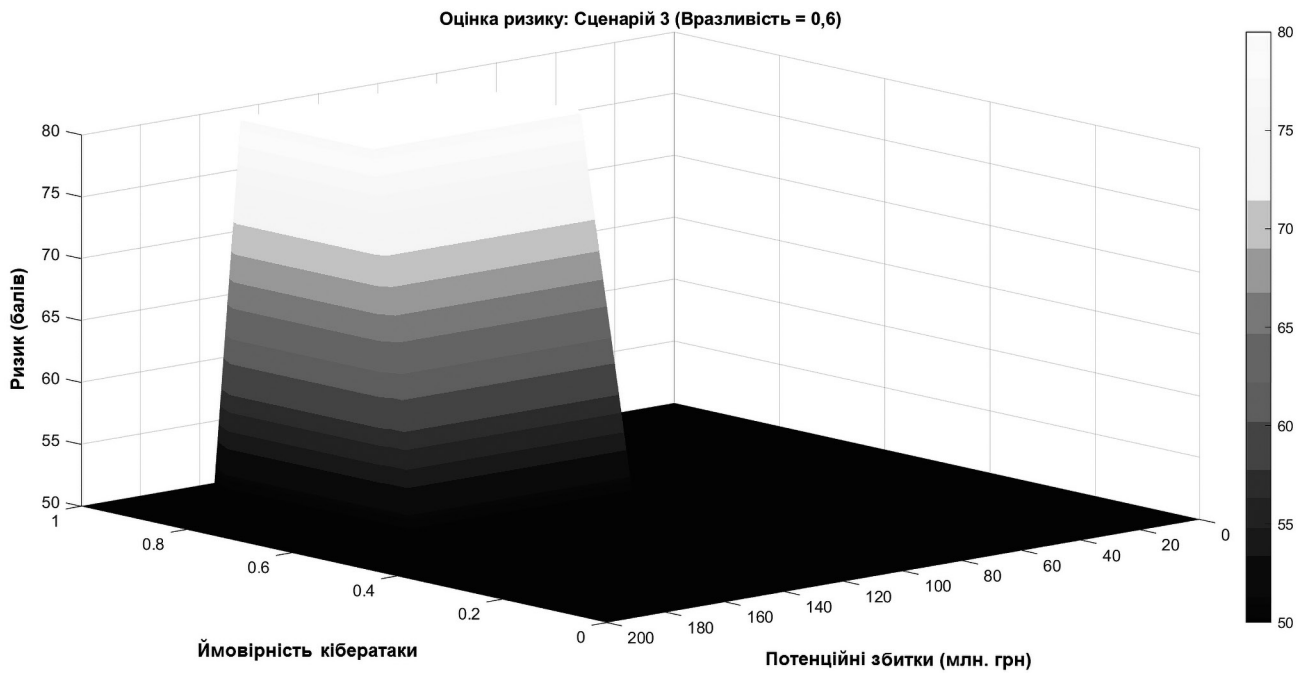
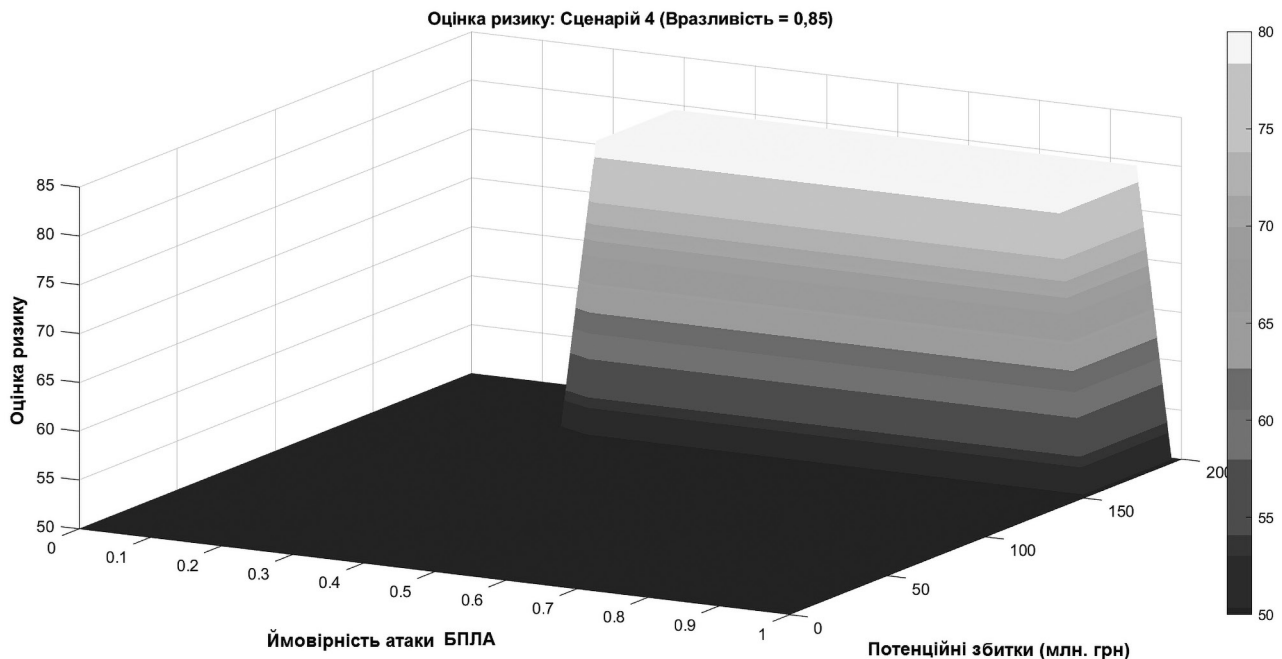


Рис. 4. Оцінка розвитку кризових ситуацій за Сценарієм 2 (переривання енергопостачання на заводі оборонної електроніки)



Р и с . 5. Оцінка розвитку кризових ситуацій за Сценарієм 3 (кіберзагроза для системи управління логістикою озброєння)



Р и с . 6. Оцінка розвитку кризових ситуацій за Сценарієм 4 (БПЛА-атака на військовий склад поблизу цивільного житла)

загроза для системи управління логістикою озброєння (кібернетична загроза)», розрахований ризик сягнув 58 балів. Хоча формально це помірний рівень, характер загрози (ланцюговий ефект порушення постачання озброєння) потребує випереджального реагування. Модель дозволила ініціювати ізоляцію вразливих елементів та перехід на захищені канали, що попередило зрив операцій і мінімізувало втрати до рівня 5 млн грн. Це демонструє, що нечітка модель здатна ідентифікувати латентні ризики, які важко виявити традиційними методами.

Аналіз сценарію 4 «Атака БПЛА на військовий склад поблизу житлового району (повітряна загроза)», показав, що при високій вразливості ($V = 0,85$) і значному очікуваному збитку ($L = 100$ млн грн), навіть при ймовірності атаки нижче критичної ($P = 0,70$), рівень ризику сягнув 85 балів, що вказує на високу суспільну небезпеку. Завдяки розробленому апарату було реалізовано розосередження запасів, посилення захисту та інформування населення, що дозволило запобігти людським жертвам і зменшити збитки до 25 % від потенційних. Це демонструє ефективність моделі в управлінні складними

комбінованими загрозами, особливо в умовах тісного сусідства військової та цивільної інфраструктури.

Кожен із проаналізованих сценаріїв підтверджує, що запропонована система нечіткого оцінювання ризиків:

- адаптивно працює з різними типами загроз (кінетичними, інфраструктурними, кібернетичними, повітряними);
- забезпечує обґрунтоване введення пріоритетів рішень;
- дозволяє досягти значного скорочення втрат та підвищення безпеки як на рівні об'єкта, так і локальної громади;
- має потенціал інтеграції у систему управління національною військовою безпекою.

З метою системного представлення отриманих результатів моделювання, нижче наведено інфографіку порівняння рівнів ризику, розрахованих для чотирьох типових сценаріїв кризових ситуацій, що охоплюють різні типи загроз (кінетичні, інфраструктурні, кібернетичні, повітряні). Кожен сценарій моделювався з використанням запропонованої нечіткої моделі оцінки ризику, а отримані результати узагальнено у вигляді графіка з візуалізацією:

- інтенсивності ризику (R , балів);
- рівня зниження втрат (%);
- класифікації рівня небезпеки за кольорами.

Такий підхід дозволяє не лише провести порівняльну оцінку ефективності впроваджених заходів, але й ідентифікувати пріоритети для оперативного реагування в майбутньому.

На рис. 7 відображено, що сценарії з високими значеннями вразливості та збитків (1 та 4) класифікуються як критичні ($R > 80$) і потребують негайного реагування, тоді як сценарії 2 і 3 демонструють потребу в превентивних заходах навіть за середнього рівня ризику.

Аналіз графіка підтверджує, що нечітка модель здатна успішно відобразити реальні відмінності між класами загроз, а також обґрунтувати тип реагування відповідно до характеру об'єкта. Інфографіка також вказує на значну кореляцію між вразливістю об'єкта та досягнутим ефектом зниження втрат, що особливо важливо для формування планів підвищення захищеності у фазі відновлення.

ВИСНОВКИ

1. Наукова новизна дослідження полягає в розробці та впровадженні комплексного науково-методичного апарату оцінки загроз і управління ризиками, адаптованого до умов ведення війни, високої невизначеності, гібридного характеру загроз і обмеженості ресурсів. Вперше модель ризик-аналізу заснована на нечіткій логіці (Fuzzy Inference System), інтегрована в стратегії відновлення критичної інфраструктури (КІ) та оборонно-промислового комплексу (ОПК) із врахуванням об'єктної пріоритизації, сценарного аналізу та багаторівневої ієрархії рішень.

2. Методологічний підхід оцінки ризиків базується на адаптації міжнародних стандартів (ISO 31000, IEC 31010, COSO ERM) до українських умов війни, з доповненням елементів нечіткої логіки, багатофакторного моделювання, мультикритеріального ранжування та сценарного аналізу. Вперше для аналізу воєнних ризиків в умовах обмеженої інформації застосовано нечітке моделювання трьох вхідних параметрів: імовірності загрози, потенційних збитків та вразливості об'єкта.

3. На прикладах чотирьох типових сценаріїв (ракетна атака, енергетичний збій, кібератака, атака БПЛА) доведено, що розроблений апарат забезпечує оперативну оцінку ризику, оптимізацію реагування та зменшення фінансових і людських втрат. Зокрема, середній рівень зниження втрат склав понад 70 %, а час ухвалення критичних рішень скоротився у 1,5...2 рази порівняно з традиційними методами.

4. Візуалізація результатів моделювання у вигляді поверхонь ризику, індексів ефективності, KPI-індикаторів та інтерактивних карт вразливості створює основу для побудови цифрової системи підтримки рішень в оборонному секторі, з інтеграцією в національні платформи кіберзахисту, логістики та територіальної оборони.

5. Отримані результати мають безпосередній прикладний вплив на підвищення воєнної безпеки України, оскільки дозволяють: формалізувати пріоритетність об'єктів відновлення, оптимізувати використання обмежених ресурсів, забезпечити узгодженість між військово-цивільним управлінням і приватним сектором, знизити системні ризики критичної інфраструктури в умовах тривалої загрози.

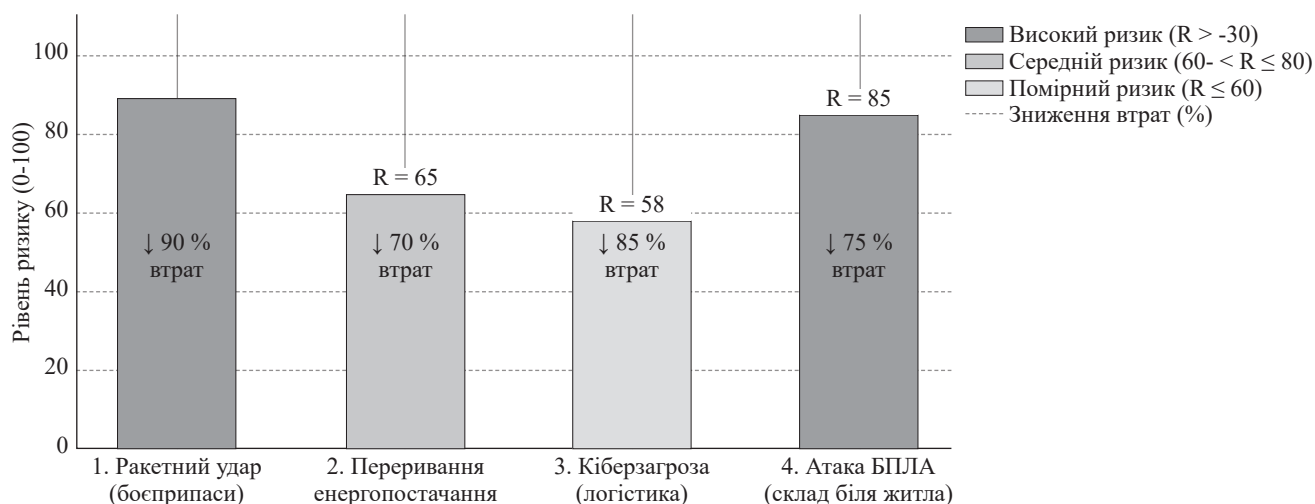


Рис. 7. Інфографіка оцінки ризику за чотирма сценаріями кризових ситуацій (результати моделювання)

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines.
2. IEC 31010:2019. Risk management – Risk assessment techniques.
3. Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*.
4. Dymova, L., Sevastianov, P. & Kaczmarek, T. (2013). A fuzzy approach to strategic risk analysis in military systems. *Applied Soft Computing*.
5. Дьяконов В., Круглов В. Алгоритмы нечёткого вывода: алгоритм Мамдани и алгоритм Сугэно. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. СПб.: Питер. 2001. С. 307—309.
6. Чепков І.Б., Гусєв Ю.В. Модель трансформації оборонних підприємств у війну через інновації. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2025. № 4 (48). С. 3—12. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.4\(48\).3-12](https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.4(48).3-12).
7. Методологія деескалації загроз і зниження впливу негативних тенденцій геополітичної та воєнно-політичної обстановки на забезпечення воєнної безпеки України: монографія / Богданович В.Ю., Муженко В.М., Цибізов А.Л., Передрій О.В. Київ: ЦНДІ ЗС України. Львів: Нац. акад. сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. 2024. 281 с.
8. Організаційні та правові аспекти забезпечення безпеки і стійкості критичної інфраструктури України: аналіт. доп. / Бобро Д.Г., Іваниюта С.П., Кондратов С.І., Суходоля О.М.; за заг. ред. О.М. Суходолі. Київ: НІСД, 2019. 224 с.
9. Братель С.Г. Досвід зарубіжних країн у сфері забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Південноукраїнський правничий часопис. 2023. № 3. С. 261—265.

REFERENCES

1. ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines.
2. IEC 31010:2019. Risk management – Risk assessment techniques.
3. Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*.
4. Dymova, L., Sevastianov, P. & Kaczmarek, T. (2013). A fuzzy approach to strategic risk analysis in military systems. *Applied Soft Computing*.
5. Dyakonov, V. & Kruglov, V. “Algoritmy nechetkogo vyvoda: algoritm Mamdani i algoritm Sugeno” [Fuzzy inference algorithms: Mamdana’s algorithm and Sugeno’s algorithm]. *Mathematical expansion packages of MATLAB. Special reference book*. SPb.: Peter. 2001. Pp. 307—309.
6. Chepkov, I.B. & Gusev, Yu.V. (2025). “Model transformatsii oboronnykh pidpriemstv u viinu cherez innovatsii” [Model of transformation of defense enterprises into war through innovations]. *Weapons and military equipment*. K.: TsNDI OVT of Armed Forces of Ukraine. No. 4 (48). Pp. 3—12. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.4\(48\).3-12](https://doi.org/1034169/2414-0651.2025.4(48).3-12).
7. Bogdanovich, V.Yu., Muzhenko, V.M., Tsybizov, A.L. & Peredriy, O.V. (2024). “Metodologiya deeskalatsii zagroz i znyzhennia vplyvu negatyvnykh tendentsii geopolitychnoi ta voienno-politychnoi obstanovky na zabezpechennia voiennoi bezpeky Ukrainy: monographii” [Methodology of de-escalation of threats and reduction of the influence of negative trends of the geopolitical and military-political situation on the provision of military security of Ukraine: monograph]. K.: ZSRI AME of Armed Forces of Ukraine. Lviv: Nat. Acad. of Ground Forces named after Hetman Petro Sagaidachny. 281 p.
8. Bobro, D.G., Ivaniuta, S.P., Kondratov, S.I. & Sukhodolia, O.M. (2019). “Organizatsiini ta pravovi aspekty zabezpechennia bezpeky i stiikosti krytychnoi infrastruktury Ukrainy: analit. dop.” [Organizational and legal aspects of ensuring the safety and stability of critical infrastructure of Ukraine]: *analyt. report*; ed. O.M. Sukhodoli. K.: NISD. 224 p.
9. Bratel, S.G. (2023). “Dosvid zarubizhnykh krain u sferi zabezpechennia bezpeky obektiv krytychnoi infrastruktury” [Experience of foreign countries in the field of ensuring the safety of critical infrastructure facilities]. *South Ukrainian Legal J.* No. 3. Pp. 261—265.

Chepkov I.B., Gusev Yu.V.

METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THREATS AND RISKS FROM THE PRODUCTION OF ARMS AND MILITARY TECHNIQUES DUE TO LARGE-SCALE DESTRUCTION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES (DEFENSE INDUSTRIAL COMPLEX)

Building a new account of the defense industry during the war and after the end of martial law, restoration of critical infrastructure facilities in Ukraine is a priority problem that also requires comprehensive scientific research. Military aggression and terrorist acts lead to significant damage to defense and military facilities, infrastructure, which threatens the military security of the state, its economic development, as well as the life and safety of the population. In the opinion of the authors, during the substantiation of measures for the formation of a promising model of the defense-industrial complex, the issue of the development of a scientific and methodological apparatus for assessing the specified type of threats and managing the corresponding risks requires mandatory research. Taking into account these threats is a key task for the formation of a stable defense industry and ensuring national security, and risk assessment in such conditions is a critical element of the national security strategy, and requires adaptation to a high degree of uncertainty, operational dynamics, as well as the interdisciplinary nature of threats. In the article, the authors present a developed three-dimensional fuzzy risk assessment model for the example of ammunition production facilities, taking into account three main variables: attack probability; expected losses; vulnerability of the object. The model was implemented in the MATLAB environment, a corresponding Fuzzy Inference System (FIS) was built, and test calculations were carried out for scenarios of high,

medium and low vulnerability. Visualization in the form of a three-dimensional surface allows prompt assessment of critical risk zones depending on input factors. The proposed model is adaptive to the Ukrainian security environment. It takes into account the changing geography of hostilities, the lack of complete information, the uneven vulnerability of defense and military facilities, as well as the operational need to prioritize the recovery of resources. Application of such a model allows creating a flexible assessment system integrated with decision-making platforms at the level of communities, military administrations and central authorities. The model of fuzzy risk assessment for munitions production facilities has demonstrated high sensitivity to the input parameters of the threat and allows entering the ranking of facilities by the degree of criticality. Using the model, the integral risk in points (0-100) was calculated for a given threat profile, a risk surface (3D) was generated, which clearly demonstrates the interdependence between key risk parameters.

The scientific value of the model lies in the fact that it takes into account the uncertainty and incompleteness of data, characteristic of military conditions, allows to introduce the ranking of objects by risk, which is the key to making decisions about evacuation, defense or duplication of production, it can be integrated into a decision support system in headquarters, defense ministries, or in the context of strategic planning.

Keywords: critical infrastructure, defense-industrial complex, typical threat scenarios (missile attack, energy failure, cyber attack, UAV attack), operational risk assessment.

Відомості про авторів:

Чепков Ігор Борисович

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

Гусєв Юрій Веніамінович

кандидат економічних наук, професор
Національний університет «Острозька академія»
м. Острів Рівненської обл.
<https://orcid.org/0009-0007-5375-7970>

Information about the authors:

Chepkov Igor

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

Gusyev Yuriy

PhD in Economics
Professor of the Department
Ostroh Academy National University
Ostroh, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-5375-7970>

Стаття надійшла до редколегії 09.10.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 327.56:341.24(470+571)

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).12-23](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).12-23)

М. А. ЧЕРНЕГА, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0003-0194-4989>

М. В. ТЕЛЕПА

<https://orcid.org/0000-0002-3573-6857>

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МІЖНАРОДНА ПІДТРИМКА УКРАЇНИ В УМОВАХ ЗБРОЙНОЇ АГРЕСІЇ. РОЛЬ САНКЦІЙ У СУЧАСНОМУ СВІТІ

У статті здійснено комплексний аналіз санкційної політики міжнародної спільноти щодо російської федерації у період 2022–2025 років у контексті повномасштабної агресії проти України. Розглянуто еволюцію санкційних пакетів Європейського Союзу, США, Великої Британії та інших партнерів, їхній вплив на військово-економічний потенціал РФ, а також виклики, пов'язані з обходом санкцій через треті країни. Особливу увагу приділено українській санкційній політиці, її інтеграції у глобальну систему обмежень та ролі у забезпеченні національної безпеки.

Окремо проаналізовано геоекономічну взаємодію РФ з Китайською Народною Республікою як чинник асиметричного партнерства та обмеженої компенсації санкційного тиску. Визначено, що санкції стали не лише інструментом економічного тиску, а й елементом глобальної безпеки, міжнародного правосуддя та геополітичної трансформації. Стаття має прикладне значення для формування стратегій стримування агресії, відновлення України та посилення санкційного контролю.

Ключові слова: санкції, міжнародна безпека, росія, Україна, Європейський Союз, Китай, економічний тиск, обхід санкцій, тінювий флот, заморожені активи, військово-промисловий комплекс, геоекономіка, міжнародне право, стратегічна автономія, санкційна коаліція.

ВСТУП

Повномасштабна агресія російської федерації проти України, розпочата 24 лютого 2022 року, стала безпрецедентним викликом не лише для української держави, але й для всієї системи міжнародної безпеки, заснованої на принципах суверенітету, територіальної цілісності та верховенства права. Україна опинилася в епіцентрі глобальної боротьби за демократичні цінності, свободу та право на самовизначення, що зумовило масштабну реакцію міжнародної спільноти.

У відповідь на агресію світова демократична коаліція розгорнула багатомірну підтримку України, яка включає військову, фінансову, гуманітарну та дипломатичну допомогу. Одним із ключових інструментів цієї підтримки стали санкції – системні обмежувальні заходи, спрямовані на стримування агресора, обмеження його доступу до фінансових ресурсів, технологій, енергетичних ринків та міжнародних інституцій.

У 2022–2025 роках санкції еволюціонували від точкових заходів до комплексної стратегії, що охопила фінанси, енергетику, технології, логістику та інформаційний простір. Їхнє застосування стало не лише інструментом економічного тиску, а й засобом демонстрації глобальної солідарності, підтримки України та захисту міжнародного правопорядку [1–3].

Метою статті є комплексний аналіз міжнародної підтримки України у війні, вивчення ролі санкцій у сучасній системі міжнародних відносин, а також оцінка їхнього впливу на економіку росії, глобальні ринки та перспективи України.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Актуальність дослідження зумовлена безпрецедентним характером повномасштабної агресії російської федерації проти України, яка стала викликом не лише для національної безпеки, а й для всієї системи міжнародного правопорядку. У відповідь на агресію міжнародна спільнота застосувала широкий спектр заходів підтримки, серед яких санкції посідають особливе місце як інструмент економічного, політичного та правового впливу.

У 2022–2025 роках санкції проти росії трансформувалися з окремих обмежувальних заходів у комплексну стратегію стримування, що охоплює фінансовий сектор, енергетику, високі технології, військово-промисловий комплекс, інформаційний простір та дипломатичні канали. Їхнє застосування стало не лише засобом тиску, а й символом глобальної солідарності з Україною, елементом формування нової архітектури безпеки в Європі та індикатором ефективності міжнародної коаліції [1–5].

Актуальність теми також визначається низкою практичних чинників. По-перше, санкції безпосередньо впливають на здатність росії вести війну, обмежуючи її доступ до ресурсів, технологій та ринків [13]. По-друге, вони створюють правові передумови для притягнення агресора до відповідальності, зокрема через механізми замороження активів та компенсації збитків [4, 26]. По-третє, санкційна політика вимагає постійного оновлення та адаптації до нових викликів, таких як обхід санкцій через треті країни, «тінювий флот» та сирій імпорт [30].

У цьому контексті вивчення санкційної політики є не лише аналізом економічних заходів, а й дослідженням нової форми глобального реагування на агресію, що поєднує правові, політичні, безпекові та гуманітарні аспекти. Це надає темі дослідження як наукової, так і прикладної значущості для формування ефективної політики стримування, відновлення та міжнародної відповідальності [6–10].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

У процесі дослідження теми санкційної політики проти російської федерації та її значення для України у 2022–2025 роках було використано низку авторитетних

джерел, що охоплюють як нормативно-правову базу, так і аналітичні матеріали міжнародних організацій.

Зокрема, офіційні документи *Європейської Комісії* (European Commission) стали основним джерелом інформації щодо змісту та еволюції санкційних пакетів ЄС. Ці матеріали дозволяють простежити логіку нарощування обмежень – від фінансових та персональних санкцій до секторальних заходів, спрямованих на енергетику, високі технології та військово-промисловий комплекс рф. Важливо, що документи ЄК містять не лише перелік заходів, а й обґрунтування їхньої доцільності, що є цінним для наукового аналізу.

Реєстр санкцій РНБО України виступає джерелом для вивчення національної санкційної політики. Він демонструє, як Україна адаптує міжнародні підходи до власного правового поля, зокрема через застосування санкцій до наукових установ, підприємств та фізичних осіб, що прямо чи опосередковано підтримують агресію.

Матеріали *Ради Безпеки ООН та Офісу з контролю за іноземними активами США* (OFAC) дозволяють оцінити глобальний характер санкційного тиску. Вони підтверджують, що санкції є не лише європейським, а й трансатлантичним інструментом стримування, що охоплює фінансові, торговельні, дипломатичні та гуманітарні аспекти.

Крім того, у статті використано аналітичні звіти міжнародних ЗМІ та дослідницьких центрів (*Reuters, Financial Times, IntSecurity Analytics*), які надають оцінку ефективності санкцій, їхнього впливу на економіку рф та адаптаційні механізми, що використовуються агресором для обходу обмежень.

Таким чином, джерельна база дослідження є репрезентативною, багатовекторною та охоплює як нормативні документи, так і аналітичні матеріали, що дозволяє здійснити комплексний аналіз санкційної політики у контексті війни росії проти України.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

У результаті проведеного аналізу встановлено, що санкційна політика Європейського Союзу, США, Великої Британії та інших партнерів України у 2022–2025 роках характеризувалася системністю, багаторівневістю та поступовою еволюцією. Від початкових фінансових та персональних обмежень вона трансформувалася у комплексну стратегію економічного, технологічного та дипломатичного тиску на російську федерацію.

1. Ескалація санкційного тиску. Протягом 2022–2025 років Європейським Союзом ухвалено 19 пакетів санкцій, кожен з яких розширював перелік заборонених товарів, технологій, фінансових операцій та суб'єктів. [1, 14–22]. Значна увага приділялася протидії обходу санкцій, зокрема через треті країни, використання так званого «тіньового флоту» та механізмів сірого імпорту [23, 30].

2. Вплив на військово-промисловий потенціал рф. Санкційні обмеження істотно ускладнили доступ росії до критично важливих технологій: мікроелектроніки, компонентів для безпілотних літальних апаратів, авіаційних деталей. Це знизило темпи виробництва озброєнь та спричинило використання у військовій сфері товарів цивільного призначення [13, 31–33].

3. Енергетичний сектор як ключовий об'єкт санкцій. Було запроваджено ембарго на нафту, вугілля, скраплений нафтовий газ (LPG), а також часткові обмеження щодо зрідженого природного газу (LNG). Застосовано механізми цінних стель, а також заборони на страхування та транспортування російських енергоносіїв. У результаті доходи російської федерації від експорту енергоресурсів до Європи скоротилися більш ніж на 70 % [11–12, 26–30].

4. Українська санкційна політика. Україна активно застосовувала власні обмежувальні заходи. У 2025 році санкції було введено проти 28 фізичних та 288 юридичних осіб, серед яких наукові установи та підприємства військово-промислового комплексу росії, а також особи, безпосередньо причетні до агресії проти України [2–5].

5. Значення санкцій для України. Аналіз засвідчує, що санкції стали багатофункціональним інструментом:

- ✓ у сфері безпеки – сприяли зниженню військових можливостей рф;
- ✓ у сфері дипломатії – сприяли консолідації міжнародної підтримки України;
- ✓ у економічному вимірі – створили перспективу використання заморожених російських активів для фінансування відбудови України;
- ✓ у контексті відновлення – стимулювали пошук альтернативних логістичних маршрутів та розширення партнерських зв'язків [14–28].

Попри масштабність, санкції не зупинили війну негайно: рф адаптується, використовуючи треті країни, криптовалюту та «тіньовий флот». Це актуалізує необхідність постійного оновлення санкційної політики та посилення міжнародного контролю за її дотриманням [26–30].

Міжнародна підтримка України

Аналіз сучасних тенденцій свідчить, що міжнародна підтримка України у 2022–2025 роках мала комплексний характер і включала військову, фінансову, гуманітарну та дипломатичну складові. Її масштаб і системність стали визначальними чинниками стійкості української держави в умовах повномасштабної агресії рф.

Військова допомога. Надання сучасних систем озброєння та засобів оборони стало ключовим чинником, що дозволило Україні стабілізувати лінію фронту та здійснювати контрнаступальні операції [31–33].

- США забезпечили Україну реактивними системами HIMARS, зенітними комплексами Patriot, танками Abrams, бронетехнікою та сприяли створенню програми підготовки до експлуатації літаків F-16.
- Велика Британія передала танки Challenger 2, системи ППО Stormer HVM і ракети дальньої дії Storm Shadow.
- Країни ЄС надали бронетехніку, артилерійські системи, зенітні комплекси IRIS-T та NASAMS, а також організували навчання українських військово-службовців.
- Канада, Австралія, Японія та інші партнери забезпечили постачання боеприпасів, дронів та обладнання, а також фінансування закупівлі озброєнь через спеціалізовані фонди.

Фінансова допомога. Значну роль у стабілізації української економіки відіграла міжнародна фінансова підтримка [34-36].

- Європейський Союз у 2022–2024 роках надав понад 70 млрд євро у вигляді грантів і кредитів.
- Міжнародний валютний фонд (у 2023 р.) схвалив чотирирічну програму Extended Fund Facility (EFF) обсягом 15,6 млрд дол. США, спрямовану на забезпечення макроекономічної стабільності.
- Світовий банк та інші фінансові інститути надали кредити та гарантії для підтримки державного бюджету та фінансування критично важливих секторів.

Гуманітарна підтримка

Міжнародні організації та країни-донори спрямовували ресурси на допомогу біженцям, постачання медичних засобів та відновлення інфраструктури. За даними УВКБ ООН, станом на кінець 2024 року за кордоном перебувало понад 6 млн українських біженців. Європейські країни надали їм доступ до системи освіти, охорони здоров'я та ринку праці. Крім того, реалізовувалися гуманітарні програми з відбудови зруйнованих шкіл, лікарень і житлових масивів [37].

Дипломатична підтримка

Україна заручилася підтримкою широкої міжнародної коаліції, що діє в межах ООН, Ради Європи, ОБСЄ, «Великої сімки» та інших майданчиків. Основні зусилля зосереджувалися на притягненні росії до відповідальності, створенні спеціального трибуналу та забезпеченні механізмів використання заморожених російських активів для відбудови України. Таким чином, міжнародна підтримка України у 2022–2025 роках носила багатомірний характер і стала фундаментом для збереження обороноздатності держави, стабілізації її економіки та забезпечення стійкості суспільства в умовах тривалої війни [38].

Роль санкцій у сучасній системі міжнародних відносин

Санкції є одним із ключових інструментів міжнародного впливу та механізмом тиску на державу-агресора. Їх застосування у XXI столітті набуло системного ха-

рактеру, поєднуючи економічні, фінансові, торговельні, секторальні, персональні та дипломатичні заходи. У випадку з російською федерацією санкції виконують низку фундаментальних функцій: послаблення військово-економічного потенціалу, перешкоджання фінансуванню війни, ізоляція від світових ринків та технологій, а також формування сигналу для міжнародного бізнесу та суспільства про неприйнятність агресивної політики. Україна, зі свого боку, активно застосовує власні санкційні механізми через Раду національної безпеки і оборони (РНБО) та національний санкційний реєстр [2].

Історична еволюція санкцій

Інститут санкцій має тривалу історію. Перші згадки про їх застосування відносяться до античності (зокрема, афінська блокада Мілета у VI ст. до н. е.). У XX столітті санкції отримали інституційне закріплення в рамках діяльності Ліги Націй та Організації Об'єднаних Націй. Відтоді вони стали невід'ємним елементом міжнародної політики та правового регулювання відносин між державами.

Правові засади застосування санкцій

Санкційна політика спирається на багаторівневу систему правових норм:

- Рада Безпеки ООН ухвалює обов'язкові санкції для всіх держав-членів;
- Європейський Союз запроваджує санкції, які є обов'язковими для всіх країн-членів;
- окремі держави (США, Велика Британія, Канада, Австралія, Японія та інші) ухвалюють національні санкційні рішення.

В Україні правові засади санкційної політики визначені Законом України «Про санкції» (2014), а формування й контроль санкційних списків здійснює РНБО [2]. Види основних санкцій представлено на рис. 1.

Роль санкцій у сучасному світі

У глобальному вимірі санкції виступають як один із провідних інструментів зовнішньої політики та колективної безпеки. Їхня роль полягає в:

- стратегічному стримуванні – обмеженні доступу агресора до критичних технологій, фінансових ресурсів та міжнародних ринків;



Рис. 1. Основні види санкцій

- економічному виснаженні – зниженні ВВП, провокуванні інфляційних процесів, падінні національної валюти та відтоку інвестицій;
- політичному тиску – міжнародній ізоляції держави-порушника, обмеженні її участі у глобальних процесах;
- моральному сигналі – демонстрації солідарності з жертвами агресії та підтвердженні відданості принципам міжнародного права.

Таким чином, санкції виступають багатовимірним інструментом впливу, що поєднує економічні та політико-правові важелі, та залишаються одним із найважливіших елементів системи сучасних міжнародних відносин.

Санкційна політика проти росії (2022–2025 рр.)

У відповідь на агресію ЄС ухвалив дев'ятнадцять основних пакетів санкцій, що наведені у табл. 1, які поступово розширюються [2, 5, 14–25].

Т а б л и ц я 1. Основні пакети санкцій міжнародної спільноти проти російської федерації у 2022–2025 роках

№ пакету санкцій	Дата ухвалення	Основні сектори	Ключові заходи
1-й	23–24.02.2022	ФІНАНСИ, ПОЛІТИКА, ТОРГІВЛЯ	Санкції проти 351 депутата Держдуми; Заборона торгівлі з «ДНР/ЛНР»; Обмеження доступу рф до фінансових ринків ЄС.
2-й	25.02.2022	ФІНАНСИ, ПЕРСОНАЛЬНІ	Замороження активів путіна і лаврова; Санкції проти членів Ради безпеки; Обмеження банків; Заборона експорту авіатехнологій.
3-й	28.02–02.03.2022	БАНКИ, ЕНЕРГЕТИКА, МЕДІА	Відключення 7 банків від SWIFT; Заборона транзакцій із Центробанком рф; Обмеження експорту енергетичних технологій; Блокування RT і Sputnik.
4-й	15.03.2022	ЕНЕРГЕТИКА, МЕТАЛУРГІЯ, РОЗКІШ, ВПК	Заборона інвестицій у енергетику; Заборона імпорту сталі; Експортні обмеження на предмети розкоші; Санкції проти компаній ВПК
5-й	08.04.2022	ВУГІЛЛЯ, ТРАНСПОРТ	Ембарго на вугілля; Заборона доступу російським суднам до портів ЄС; Обмеження для автоперевізників із рф і Білорусії; Обмеження на високотехнологічний експорт.
6-й	03.06.2022	НАФТА, ФІНАНСИ, МЕДІА	Часткове нафтове ембарго (морські поставки та винятки для трубопроводів); Відключення Сбербанку від SWIFT; Заборона мовлення трьох пропагандистських каналів.
7-й	21.07.2022	ЗОЛОТО, КОНТРОЛЬ	Заборона імпорту золота; Посилення контролю за обходом; Нові персональні санкції (розширення списків осіб).
8-й	06.10.2022	НАФТА, ВПК, ТОРГІВЛЯ	Запровадження цінової стелі на російську нафту; Заборона морських перевезень вище стелі; Нові експортно-імпортні обмеження; Обмеження для ВПК.
9-й	16.12.2022	ВПК, ФІНАНСИ, ТОРГІВЛЯ	Санкції проти 200 осіб і організацій; Заборона експорту товарів подвійного призначення; Заборона експорту товарів для дронів; Нові фінансові та інвестиційні обмеження.
10-й	25.02.2023	ЕЛЕКТРОНІКА, ВПК, ФІНАНСИ	Санкції проти 120 фізичних і юридичних осіб; Обмеження експорту електронних компонентів; Санкції проти іранських компаній за постачання дронів; Обмеження для російських банків.
11-й	23.06.2023	АНТИОБХІД, ТРАНСПОРТ	Запроваджено механізм протидії обходу санкцій; Санкції проти компаній у Китаї, ОАЕ, Вірменії, Узбекистані; Нові транспортні обмеження.
12-й	18.12.2023	АЛМАЗИ, LPG, ФІНАНСИ	Заборона імпорту алмазів; Обмеження на імпорт LPG; Посилення цінової стелі на нафту; Нові технологічні та фінансові санкції.
13-й	23.02.2024	ВПК, ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА, ТРЕТІ КРАЇНИ	~194 нові включення: 106 осіб, 88 організацій; Секторальні санкції: обмеження експорту передових технологій, компонентів для дронів, електроніки, матеріалів подвійного призначення.

№ пакету санкцій	Дата ухвалення	Основні сектори	Ключові заходи
			Санкції проти компаній з третіх країн (Китай, Індія, Казахстан, Туреччина тощо) через участь у постачанні компонентів.
14-й	24.06.2024	ПРОМИСЛОВІСТЬ, ЕНЕРГЕТИКА	Забора на експорту 9 нових товарів подвійного призначення (наприклад, мікрохвильові підсилювачі, прилади запису польотів, всюдорожні транспортні засоби); Посилення обмежень на експорт промислових продуктів і передових технологій; Забора на імпорту гелію (забора на експорт товарів, які можуть використовуватись у військових цілях); Розширення санкційного списку суб'єктів (у тому числі в третіх країнах) із залученням до виробництва або підтримки військового комплексу рф.
15-й	16.12.2024	НАФТА, ТРАНСПОРТ, КИТАЙ	Санкції проти «тіньового флоту» (shadow fleet) – суден, що використовуються для обходу ембарго чи цінових обмежень на нафту; Боротьба з обхідними каналами санкцій, включення нових юридичних осіб та осіб, що сприяють обходу санкцій; «Fully-fledged sanctions» на деяких китайських «акторів» – з блокуванням активів, забороною на ресурси.
16-й	24.02.2025	СУДНОПЛАВСТВО, ВПК, ФІНАНСИ	До списків додано 48 осіб і 35 компаній (зокрема, компанії, пов'язані з виробництвом зброї, боєприпасів, технологій); Розширення «shadow fleet»: +74 судна (всього ~153) Мета – обмежити вантажопотоки, що сприяють обхідним схемам; Заходи проти виробників/постачальників товарів, які можуть бути використані у військовій промисловості; Обмеження у фінансовому секторі, зокрема до транзакцій через регіональні банки, які допомагають із обходом санкцій.
17-й	20.05.2025	ЕНЕРГЕТИКА, СУДНОПЛАВСТВО, ТРЕТІ КРАЇНИ	Велика увага «shadow fleet»: +189 суден у санкційні списки (~342 загалом); Нові списки («listings») осіб та організацій: 75 одиниць, заморожування активів, забора на фінансові послуги та ресурси; До санкційних списків додані нові компанії (31) – як у рф, так і в третіх країнах (Туреччина, В'єтнам, ОАЕ, Сербія, Узбекистан) – що підтримують ВПК або сприяють обходу; Посилення обмежень на імпорту енергоносіїв, на «енергетичні доходи» рф; Збереження винятків для проєктів чи країн, коли це аргументується питаннями енергетичної безпеки (наприклад, проєкт Sakhalin-2).
18-й	18.07.2025	ЕНЕРГЕТИКА, ФІНАНСИ, ВПК, ТОРГІВЛЯ З ЄС	<i>Один з найжорсткіших пакетів...</i> Нарощення списків санкційних осіб та організацій – понад 2500; Додано нові експортні заборони, зокрема для передових технологій для військових потреб та нові обмеження у фінансовій і енергетичній сферах; Забора на компанії в третіх країнах, що підтримують рф (наприклад, 11 таких компаній з Туреччини, Китаю/Гонконгу); Посилення заходів проти порушення авторства культурної спадщини та проти злочинів щодо дітей; Посилення заходів проти обходу санкцій.
19-й (процес)	09.2025 (запропонований / ухвалення у процесі)	LNG, ФІНАНСИ, ВПК, ПРАВА ЛЮДИНИ	Повна забора на імпорту LNG до 2027; Зняття залишкових винятків для Rosneft та Gazprom Neft; Додаткові санкції та замороження активів проти нафтопереробних заводів, трейдерів нафти, нафтохімічних компаній, включно в третіх країнах (наприклад, Китай); Забора на операції з російськими та третіх країн банками (санкції проти систем швидких платежів та кредитної карткової системи рф); Санкції щодо спеціальних економічних зон рф, які пов'язані з війною; Посилення санкцій на технології – AI, геопросторові дані, критичні ресурси, які використовуються у виробництві зброї; Санкції проти осіб, залучених до викрадення та насильницького перевезення українських дітей і інститутів, що здійснюють «перевиховання».

Санкційна політика ЄС розвивалась у чітко виражених фазах:

2022 рік – фаза шоку та швидкої реакції: перші 6 пакетів були спрямовані на фінансову ізоляцію, блокування доступу до технологій, енергетичних ресурсів та медіа. Відключення банків від SWIFT, ембарго на вугілля та часткове нафтове ембарго стали ключовими інструментами [4, 26–28].

2023 рік – фаза структурного посилення: акцент на боротьбі з обходом санкцій, розширення географії санкцій (треті країни), запровадження механізмів контролю та нових обмежень у сфері електроніки, ВПК, алмазів, LPG [12–13, 30].

2024–2025 рр. – фаза системної ізоляції та глобалізації санкцій: санкції охоплюють не лише рф і Білорусь, а й компанії з третіх країн, які сприяють обходу. З'являються санкції проти «тіньового флоту», спеціальних економічних зон, а також заходи у сфері прав людини (викрадення дітей, культурна спадщина) [6–8, 10, 30].

Ці санкційні пакети доповнюються обмеженнями США, Великої Британії, Канади, Японії, Австралії, які формують глобальний санкційний фронт.

Вплив санкцій на економіку росії та міжнародні ринки

Міжнародні санкції проти російської федерації, запроваджені з 2022 року, стали безпрецедентними за масштабом і комплексністю. Вони вдарили одразу по кількох ключових напрямках – від фінансової системи до енергетики, від високих технологій до інформаційного простору, – і поступово перетворилися на один із головних чинників, що визначають нинішню динаміку російської економіки.

Найчутливішим ударом стало відключення понад десяти провідних банків від міжнародної системи SWIFT, заборона операцій із Центральним банком та блокування золотовалютних резервів на суму понад 300 мільярдів доларів США [4, 26]. Для держави, яка активно використовувала фінансові інструменти для підтримки війни та внутрішньої стабільності, це стало серйозним обмеженням. Рубль втратив стійкість, доступ до зовнішніх ресурсів практично зник, а запозичення перетворилися на дорогий і ризикований механізм.

Не менш відчутними стали обмеження в енергетичній сфері. Традиційна залежність бюджету від продажу нафти та газу зробила рф вразливою до рішень країн ЄС та «Великої сімки». Ембарго на нафту й вугілля, запровадження цінового обмеження на нафту та скорочення експорту енергоресурсів до Європи майже на 70% призвели до різкого падіння доходів [6, 11, 29]. Якщо у

2021 році виручка від енергоносіїв перевищувала 220 мільярдів доларів, то у 2025-му вона знизилася приблизно до 140 мільярдів [6, 29]. Росія намагається компенсувати втрати за рахунок ринків Азії, однак вимушене використання «тіньового флоту» і посередницьких схем лише збільшує витрати та зменшує прибуток.

Санкції у сфері технологій та військово-промислового комплексу стали ще одним довготривалим викликом. Заборона на експорт мікрочипів, авіаційних деталей та обладнання подвійного призначення створила серйозний дефіцит компонентів. До 2025 року понад 65% критично важливих технологій виявилися недоступними для росії [6, 13, 34]. Це не лише уповільнило модернізацію озброєнь, а й призвело до парадоксальних рішень – використання побутової електроніки у військовій техніці [33]. Таким чином, російський ВПК поступово втрачає конкурентоздатність і технологічну гнучкість.

В інформаційній сфері Європейський Союз заблокував мовлення російських державних медіа та наклав санкції на ключових пропагандистів. Це зменшило вплив Кремля на міжнародний інформаційний простір, ускладнило поширення дезінформації та змусило росію шукати нові канали впливу.

Ефект санкцій позначився на макроекономіці: у 2022–2023 роках ВВП рф скоротився на 1,5–3,1%, що принесло втрати у сотні мільярдів доларів [6, 8]. Зниження енергетичних доходів примусило уряд підвищувати податки та посилювати фіскальний тиск, зокрема у 2025 році ставка ПДВ була піднята до 22 відсотків [9]. Такі кроки свідчать про зростання внутрішніх проблем, які вже не вдається приховати за фасадом «стійкості». Вплив санкцій на економіку росії представлено в табл. 2.

Втім, санкційний тиск відчули й міжнародні ринки. Світова енергетика у 2022–2023 роках пережила хвилю цінової турбулентності, проте поступово змогла збалансуватися завдяки переорієнтації поставок і диверсифікації джерел. Інша ситуація у судноплаванні: поява «тіньового флоту» призвела до зростання страхових ризиків та вартості фрахту. У технологічному секторі помітне зміщення ланцюгів постачань на користь азійських виробників, що створює нові точки геополітичного напруження [9, 11, 26–28].

Майбутнє санкційної політики визначатиметься не лише силою обмежень, а й їхньою гнучкістю. Необхідно посилювати контроль за обходом санкцій – особливо у сфері судноплавання та страхування. Пріоритетом залишається обмеження доступу росії до передових технологій, адже саме технологічна відсталість поступово виснажує її військово-промисловий потенціал. Не менш

Т а б л и ц я 2. Вплив санкцій на економіку росії

Рік	Виручка від енергоносіїв, млрд \$	Блоковані високотехнологічні компоненти, %	Орієнтовний вплив на ВВП, %
2021	220	10	0,0
2022	210	25	-1,5
2023	180	40	-3,1
2024	150	55	-2,8
2025	140	65	-3,5

важливим є балансування санкцій із глобальною економічною стабільністю: світові ринки потребують гарантій енергетичної безпеки, альтернативних постачань і розвитку відновлюваної енергетики. І, звісно, санкції мають супроводжуватися інформаційною політикою: лише протидія пропаганді й підтримка незалежних медіа робить економічний тиск по-справжньому всеосяжним. У цьому сенсі санкції – це не лише каральний механізм, а й інструмент глобальної безпеки, здатний не допустити, щоб агресія ставала економічно вигідною [23].

Хоча санкції не призвели до негайного припинення війни, їх довгостроковий вплив є значним:

- російська економіка зазнала серйозних втрат, зокрема в енергетичному секторі, банківській сфері та високотехнологічному виробництві.
- Відбувся відтік іноземних компаній, що спричинило втрату робочих місць і технологій.
- Обмеження на імпорт та експорт призвели до дефіциту товарів і зниження якості життя.
- Санкції стимулювали внутрішню мобілізацію ресурсів, але не змогли компенсувати втрати.

Значення санкцій для України (2022–2025 роках)

Санкційна політика 2022–2025 років стала ключовим інструментом тиску на росію та важливим чинником стратегії безпеки України. Власні санкції нашої держави відображали перехід від захисту до контрнаступу в економічній сфері, спрямовуючись на перекриття фінансів і зниження технологічного потенціалу агресора.

Вирішальними залишалися міжнародні санкції ЄС, США, Великої Британії, Канади та інших партнерів, які комплексно вдарили по фінансах, енергетиці й оборонці рф, поступово виснажуючи її економіку. Важливою особливістю стало поступове розширення санкційних пакетів, яке дозволяло поєднувати ефект «шоку» з довгостроковим виснаженням економіки рф. Так, 19-й пакет став черговим підтвердженням здатності санкційної коаліції до послідовності й рішучості. Попри адаптацію росії через «тіньові» схеми та азійські ринки, технологічні та фінансові втрати мають незворотний характер.

У науковому вимірі санкції варто розглядати не лише як реактивний захід, а як інструмент довготривалої стратегії. Вони створюють асиметричний ефект: росія стикається з технологічним відставанням, падінням експортних доходів та зростанням транзакційних витрат, тоді як Україна отримує простір для зміцнення міжнародних

альянсів, поглиблення європейської інтеграції та формування нової економічної ідентичності.

Для України санкції стали стимулом структурних змін: розвиток сухопутних експортних маршрутів, інтеграція в європейські ланцюги доданої вартості, посилення стійкості економіки. Водночас вони відкрили простір для міжнародних альянсів і поглиблення євроінтеграції. Хоча санкції не призвели до швидкої перемоги, вони обмежили ресурсну базу агресора та підтримали відновлення України. У майбутньому вони можуть стати механізмом відбудови через використання заморожених російських активів [31–38].

Взаємодія російської федерації з Китайською Народною Республікою як виклик для санкційної ефективності: роль КНР у стратегії обходу обмежень

У контексті санкційної політики проти російської федерації у 2022–2025 роках особливого значення набуває фактор співпраці з Китайською Народною Республікою (КНР), яка стала ключовим економічним партнером рф після втрати доступу до західних ринків [39–40]. Частка КНР у зовнішньоторговельному обороті росії перевищила 35 %, а в імпорті високотехнологічної продукції – понад 50 %, що дозволило частково компенсувати наслідки санкційного тиску. Через китайські компанії росія отримувала критично важливі товари подвійного призначення, електронні компоненти та обладнання для військово-промислового комплексу, що зумовило збереження виробничих потужностей у стратегічних секторах.

Однак така співпраця має подвійний характер. З одного боку, Китай виступає донором економічної стійкості рф, забезпечуючи альтернативні канали постачання та фінансові інструменти. З іншого – Пекін демонструє прагматизм, обмежуючи підтримку росії у сферах, що можуть поставити під загрозу власну економічну безпеку або призвести до вторинних санкцій з боку США та ЄС. Геоekonomічна роль КНР у санкційному контексті представлена в табл. 3 [16, 27, 41]. Зокрема, китайські банки дедалі обережніше працюють із російськими контрагентами, а обсяги офіційної співпраці у стратегічних галузях залишаються контрольованими. У 2024–2025 роках Європейський Союз і США вже запровадили санкції проти низки китайських компаній, що брали участь у постачанні компонентів для російської

Таблиця 3. Геоekonomічна роль КНР у санкційному контексті: сфери взаємодії, обмеження та ризики для рф

Сфера	Роль Китаю для рф	Обмеження / наслідки	Потенційні переваги для рф	Ключові ризики та обмеження
Торгівля	> 35 % зовнішнього обороту рф; основний ринок збуту енергоресурсів	Залежність від одного ринку; КНР диктує цінові умови, використовуючи позицію домінування	Забезпечення стабільного ринку збуту енергоносіїв та імпорту промислових товарів; збереження обсягів експорту після втрати ЄС	Формування критичної залежності від одного партнера; асиметричність у ціноутворенні, де КНР диктує умови
Технології	Поставки електроніки, мікрочипів, товарів подвійного призначення	Ризик вторинних санкцій; обмеження офіційних поставок, зростання «сірих схем»	Доступ до електронних компонентів, обладнання подвійного призначення, часткова компенсація технологічного ембарго Заходу	Обмежений характер постачань через ризик вторинних санкцій; переважання «сірих» каналів із високими витратами

Сфера	Роль Китаю для рф	Обмеження / наслідки	Потенційні переваги для рф	Ключові ризики та обмеження
Фінанси	Альтернативні канали платежів (CIPS, юань у розрахунках)	Китайські банки уникають ризикових операцій; обмежений доступ рф навіть до китайських кредитів	Розширення використання юаня в міжнародних розрахунках; альтернативні канали платежів через систему CIPS	Обережність китайських банків, які уникають операцій із рф; відсутність доступу до повноцінного кредитування
Енергетика	Закупівля нафти, газу, вугілля за знижками; нові трубопровідні проекти	росія продає зі значним дисконтом; інфраструктурна залежність від китайського попиту	Підтримка експорту нафти, газу й вугілля; перспективи нових інфраструктурних проектів («Сила Сибіру-2»)	Продаж енергоносіїв зі значними знижками; інфраструктурна й логістична залежність від китайського попиту
Геополітика	Декларативна підтримка на міжнародних майданчиках; спільні інтереси проти США/ЄС	Китай уникає відкритої участі у війні; балансування між вигодою від рф та доступом до Заходу	Декларативна підтримка на міжнародних майданчиках; спільність інтересів у протистоянні США та ЄС	Відсутність готовності КНР до відкритої конфронтації із Заходом; ризик перетворення рф на «молодшого партнера»

військової техніки, що свідчить про посилення санкційного контролю за «сірими каналами» обходу.

У стратегічному вимірі така модель взаємодії формує асиметричне партнерство, у межах якого росія, намагаючись обійти санкції, фактично поступається економічним суверенітетом на користь КНР. Це знижує суб'єктність рф у міжнародній системі, обмежує її здатність до самостійного маневру та закріплює залежність від зовнішніх «акторів». У перспективі 2026 роль Китаю у пом'якшенні санкційного тиску залишатиметься значною, проте не безмежною: очікується трансформація каналів постачання у більш приховані форми, зростання ризиків для китайських компаній та посилення міжнародного контролю. Таким чином, співпраця рф – КНР є не лише інструментом обходу санкцій, а й чинником, що визначає межі стратегічної автономії росії в умовах глобального санкційного режиму [42–47].

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження засвідчило, що санкційна політика міжнародної спільноти проти російської федерації у 2022–2025 роках набула системного, багатовимірного та еволюційного характеру. Вона поєднала економічні, фінансові, енергетичні, технологічні та дипломатичні інструменти тиску, поступово трансформуючись із точкових обмежень у комплексну стратегію глобальної ізоляції агресора. Ефективність санкційного режиму підтверджується здатністю міжнародної коаліції адаптуватися до нових викликів, зокрема до спроб обходу санкцій через треті країни, тіньові механізми та фінансові проксі [1–9].

Санкції істотно послабили військово-економічний потенціал рф, обмежили її доступ до критичних технологій і фінансових ресурсів, спричинили падіння доходів від експорту енергоносіїв та деформацію промислової структури. Водночас вони виконали важливу політичну і правову функцію, сприяючи консолідації міжнародної підтримки України, формуванню передумов для використання заморожених активів агресора у відбудові та закріпленню механізмів міжнародної відповідальності за порушення норм права [10–30].

Українська санкційна політика, інтегрована у глобальну систему обмежень, стала важливим елементом забезпечення національної безпеки та посилення стійкості держави. Вона продемонструвала зростання суб'єктності України у міжнародних економічних процесах, зокрема через ініціативи, спрямовані на блокування фінансових потоків агресора, обмеження його технологічного потенціалу та формування нових логістичних маршрутів [31–41].

Окрему увагу слід приділити співпраці рф з Китайською Народною Республікою, яка стала важливим чинником у стратегії обходу санкцій. Хоча КНР забезпечує росії доступ до ринків, технологій та фінансових інструментів, така взаємодія має асиметричний характер і формує залежність рф від китайських інтересів. Це обмежує стратегічну автономію росії, створює ризики вторинних санкцій, контрольованість постачань і геоекономічну вразливість. У стратегічному вимірі така модель партнерства знижує суб'єктність рф у міжнародній системі та закріплює її роль як залежного «актора» [42–47].

Попри те, що санкції не призвели до негайного припинення війни, вони заклали основу для довготривалого стратегічного виснаження агресора, водночас утвердивши санкційний режим як невід'ємний інструмент сучасних міжнародних відносин і механізм захисту світового правопорядку.

Подальші дослідження та практичні заходи мають бути спрямовані на: посилення координації між країнами-партнерами у сфері санкційного контролю; створення ефективних механізмів протидії обходу санкцій через треті країни; удосконалення системи моніторингу та прозорості фінансових потоків; розширення санкцій на нові сектори економіки, що мають критичне значення для військово-промислового комплексу рф; інституціоналізацію процесу використання заморожених активів агресора для відбудови України; формування міжнародно-правових механізмів, здатних забезпечити невідворотність відповідальності за агресію та злочини війни.

Таким чином, санкції 2022–2025 років слід розглядати не лише як інструмент економічного тиску, а як фактор

геополітичної трансформації, що утвердив Україну як активного суб'єкта міжнародної політики та продемонстрував здатність економічних важелів змінювати хід війни.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- European Commission. EU sanctions against russia. Available at: <https://finance.ec.europa.eu/eu-and-world/sanctions>.
- Рада національної безпеки і оборони України. Реєстр санкцій. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sanctions.rnbo.gov.ua>.
- United Nations Security Council. Sanctions regimes. Available at: <https://www.un.org/securitycouncil/sanctions/information>.
- U.S. Department of the Treasury. Sanctions Programs and Information. Available at: <https://ofac.treasury.gov/>.
- Official J. of the European Union. Restrictive measures in view of russia's actions destabilising Ukraine. OJ L 42. 2022–2024.
- IntSecurity Analytics. russian economy: impact of sanctions. Available at: <https://analytics.intsecurity.org/russian-economy-impact-of-sanctions/>.
- How Sanctions Have Changed russian Economic Policy. Carnegie Endowment for International Peace. Available at: <https://carnegieendowment.org/russia-eurasia/politika/2023/04/how-sanctions-have-changed-russian-economic-policy?lang=en>.
- Council of the EU (Consilium). Impact of sanctions on russian economy (infographic). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/impact-sanctions-russian-economy/>.
- Financial Times. Повідомлення про підвищення ПДВ у рф. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ft.com/content/5670b847-02b9-49ae-bf0c-98eb26a52a62>.
- Fortress russia: the economy has adapted well... Chatham House. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/09/fortress-russia-economy-has-adapted-well-pressure-stagflation-presents-opportunity-west>.
- August 2025 monthly analysis of russian fossil fuel exports and sanctions. Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). Available at: <https://energyandcleanair.org/august-2025-monthly-analysis-of-russian-fossil-fuel-exports-and-sanctions/>.
- Article on oil sanctions and price cap. ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421525002460>.
- The Impact of Semiconductor Sanctions on russia. American Enterprise Institute (AEI). Available at: <https://www.aei.org/wp-content/uploads/2024/04/The-Impact-of-Semiconductor-Sanctions-on-russia.pdf>.
- European Commission. EU adopts 13th package of sanctions against russia after two years of its war of aggression against Ukraine. Available at: https://finance.ec.europa.eu/news/eu-adopts-13th-package-sanctions-against-russia-after-two-years-its-war-aggression-against-ukraine-2024-02-23_en.
- Government Offices of Sweden. Fifteenth package of sanctions against russia adopted. Available at: <https://www.government.se/press-releases/2024/12/fifteenth-package-of-sanctions-against-russia-adopted/>.
- EU adopts 16th sanctions package against russia. European Commission (DG NEAR). Available at: https://enlargement.ec.europa.eu/news/eu-adopts-16th-sanctions-package-against-russia-2025-02-24_en.
- EU agrees 17th package of sanctions. Council of the EU (Consilium). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/05/20/russia-s-war-of-aggression-against-ukraine-eu-agrees-17th-package-of-sanctions/>.
- European Commission. EU adopts 18th package of sanctions. Available at: https://finance.ec.europa.eu/news/eu-adopts-18th-package-sanctions-against-russia-2025-07-18_en.
- EU adopts 18th package of economic and individual measures. Council of the EU (Consilium). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/07/18/russia-s-war-of-aggression-against-ukraine-eu-adopts-18th-package-of-economic-and-individual-measures/>.
- Statement by the High Representative/Vice-President Kaja Kallas on the 19th package of sanctions. EEAS. Available at: https://www.eeas.europa.eu/delegations/ukraine/statement-high-representativevice-president-kaja-kallas-19th-package-sanctions_en.
- EU sanctions against russia explained. Council of the EU. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/sanctions-against-russia-explained/>.
- Timeline – EU sanctions against russia. Council of the EU. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/sanctions-against-russia/timeline-sanctions-against-russia/>.
- EU sanctions against russia 2025: State of play, perspectives and challenges. European Parliamentary Research Service. Available at: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/767243/EPRS_BRI%282025%29767243_EN.pdf.
- EU adopts 18th package of sanctions against russia. European Commission. Available at: https://enlargement.ec.europa.eu/news/eu-adopts-18th-package-sanctions-against-russia-2025-07-18_en.
- Russia's war of aggression against Ukraine: EU adopts 18th package of economic and individual measures. Council of the EU. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/07/18/russia-s-war-of-aggression-against-ukraine-eu-adopts-18th-package-of-economic-and-individual-measures/>.
- Russia-related Sanctions. U.S. Department of the Treasury, OFAC. Available at: <https://ofac.treasury.gov/sanctions-programs-and-country-information/russia-related-sanctions>.
- Russian Harmful Foreign Activities Sanctions. OFAC. Available at: <https://ofac.treasury.gov/sanctions-programs-and-country-information/russian-harmful-foreign-activities-sanctions/>.
- U.S. Department of the Treasury. Treasury Intensifies Sanctions Against russia by Targeting russia's Oil Production and Exports. Available at: <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2777>.
- July 2025 — Monthly analysis of russian fossil fuel exports and sanctions. Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). Available at: <https://energyandcleanair.org/>

- july-2025-monthly-analysis-of-russian-fossil-fuel-exports-and-sanctions/.
30. Tackling the russian «Shadow» Fleet: Policy Briefing. CREA. Available at: https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2024/09/State-Capture_CREA_Shadow-fleet-policy-briefing_Final_08.2024.pdf.
 31. U.S. Department of State. U.S. Security Cooperation with Ukraine. Available at: <https://www.state.gov/u-s-security-cooperation-with-ukraine/>.
 32. UK support to Ukraine: factsheet. GOV.UK. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-support-to-ukraine-factsheet/uk-support-to-ukraine-factsheet>.
 33. Wikipedia. List of military aid to Ukraine during the russo-Ukrainian War. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_military_aid_to_Ukraine_during_the_Russo-Ukrainian_War.
 34. Фінансова підтримка України Європейським Союзом. European Commission. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://commission.europa.eu/topics/eu-solidarity-ukraine/eu-assistance-ukraine/eu-financial-support-ukraine_uk.
 35. Програма України, підтримана в рамках Механізму розширеного фінансування. Intern. Monetary Fund (IMF). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.imf.org/uk/News/Articles/2023/03/31/pr23101-ukraine-imf-executive-board-approves-usd-billion-new-eff-part-of-overall-support-package>.
 36. Foreign assistance to Ukraine (2022–2024). PMC Research. Available at: https://www.pmcresearch.org/slider_file/a5ae67cee53315aa8.pdf.
 37. Annual Results Report – 2024 Ukraine. UNHCR. Available at: <https://www.unhcr.org/sites/default/files/2025-06/Ukraine%20ARR%202024.pdf>.
 38. European Parliament. Verbatim report of proceedings – Frozen russian assets (debate) – Wednesday, 12 March 2025. Available at: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/CRE-10-2025-03-12-ITM-014_EN.html.
 39. Chatham House. Tightening the oil-price cap to increase the pressure on russia. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/09/tightening-oil-price-cap-increase-pressure-russia/what-wrong-current-approach-sanctions>.
 40. Chatham House. The «Fortress russia» economy has adapted well to pressure. But stagflation presents an opportunity for the West. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/09/fortress-russia-economy-has-adapted-well-pressure-stagflation-presents-opportunity-west>.
 41. Russia's struggle to modernize its military industry: The impact of sanctions and war. Chatham House. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/07/russias-struggle-modernize-its-military-industry/impact-sanctions-and-war-and-how-opk>.
 42. Ринок збуту рф і Китай. UNIAN. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unian.ua/economics/other/ryatuue-abo-peretvoryuue-na-raba-nyt-rozkriloshemu-torgivli-kitayu-z-rosiyeyu-13077087.html>.
 43. Світовий банк і росія. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.worldbank.org/en/country/russia>.
 44. Економічна перевага Китаю та військовий потенціал рф. Bintel.org.ua. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bintel.org.ua/publication/regions/china/kitajsko-rosijskij-alyans/>.
 45. Стратегічне партнерство КНР–рф. Foreignukraines.com. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://foreignukraines.com/2025/01/01/how-the-war-in-ukraine-strengthened-the-strategic-partnership-between-china-and-russia/>.
 46. Китай та обхід санкцій рф. Novyny.pro. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://novyny.pro/news/ekonomika/finansovi-mahinaciji-putina-yak-kitay-dopomagaye-rosiji-obiyti-zahidni-sankciji-5254.html>.
 47. Harvard Univ. Study. Захід, росія та Китай. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://foreignukraines.com/2024/10/09/harvard-university-published-a-study-on-how-the-west-russia-and-china-benefit-from-the-war-in-ukraine/>.

REFERENCES

1. European Commission. EU sanctions against russia. Available at: <https://finance.ec.europa.eu/eu-and-world/sanctions>.
2. “Rada natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy. Reiestr sanktsii” [National Security and Defense Council of Ukraine. Sanctions Register]. Available at: <https://sanctions.rnbo.gov.ua>.
3. United Nations Security Council. Sanctions regimes. Available at: <https://www.un.org/securitycouncil/sanctions/information>.
4. U.S. Department of the Treasury. Sanctions Programs and Information. Available at: <https://ofac.treasury.gov/>.
5. Official J. of the European Union. Restrictive measures in view of russia's actions destabilising Ukraine. OJ L 42. 2022–2024.
6. IntSecurity Analytics. russian economy: impact of sanctions. Available at: <https://analytics.intsecurity.org/russian-economy-impact-of-sanctions/>.
7. How Sanctions Have Changed russian Economic Policy. Carnegie Endowment for International Peace. Available at: <https://carnegieendowment.org/russia-eurasia/politika/2023/04/how-sanctions-have-changed-russian-economic-policy?lang=en>.
8. Council of the EU (Consilium). Impact of sanctions on russian economy (infographic). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/impact-sanctions-russian-economy/>.
9. Financial Times. “Povidomlennia pro pidvyshchennia PDV u rf” [Notification of VAT increase in the russian federation]. Available at: <https://www.ft.com/content/5670b847-02b9-49ac-bf0c-98eb26a52a62>.
10. Fortress russia: the economy has adapted well... Chatham House. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/09/fortress-russia-economy-has-adapted-well-pressure-stagflation-presents-opportunity-west>.
11. August 2025 monthly analysis of russian fossil fuel exports and sanctions. Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). Available at: <https://energyandcleanair.org/august-2025-monthly-analysis-of-russian-fossil-fuel-exports-and-sanctions/>.
12. Article on oil sanctions and price cap. ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421525002460>.

13. The Impact of Semiconductor Sanctions on russia. American Enterprise Institute (AEI). Available at: <https://www.aei.org/wp-content/uploads/2024/04/The-Impact-of-Semiconductor-Sanctions-on-russia.pdf>.
14. European Commission. EU adopts 13th package of sanctions against russia after two years of its war of aggression against Ukraine. Available at: https://finance.ec.europa.eu/news/eu-adopts-13th-package-sanctions-against-russia-after-two-years-its-war-aggression-against-ukraine-2024-02-23_en.
15. Government Offices of Sweden. Fifteenth package of sanctions against russia adopted. Available at: <https://www.government.se/press-releases/2024/12/fifteenth-package-of-sanctions-against-russia-adopted/>.
16. EU adopts 16th sanctions package against russia. European Commission (DG NEAR). Available at: https://enlargement.ec.europa.eu/news/eu-adopts-16th-sanctions-package-against-russia-2025-02-24_en.
17. EU agrees 17th package of sanctions. Council of the EU (Consilium). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/05/20/russia-s-war-of-aggression-against-ukraine-eu-agrees-17th-package-of-sanctions/>.
18. European Commission. EU adopts 18th package of sanctions. Available at: https://finance.ec.europa.eu/news/eu-adopts-18th-package-sanctions-against-russia-2025-07-18_en.
19. EU adopts 18th package of economic and individual measures. Council of the EU (Consilium). Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/07/18/russia-s-war-of-aggression-against-ukraine-eu-adopts-18th-package-of-economic-and-individual-measures/>.
20. Statement by the High Representative/Vice-President Kaja Kallas on the 19th package of sanctions. EEAS. Available at: https://www.eeas.europa.eu/delegations/ukraine/statement-high-representativevice-president-kaja-kallas-19th-package-sanctions_en.
21. EU sanctions against russia explained. Council of the EU. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/sanctions-against-russia-explained/>.
22. Timeline – EU sanctions against russia. Council of the EU. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/sanctions-against-russia/timeline-sanctions-against-russia/>.
23. EU sanctions against russia 2025: State of play, perspectives and challenges. European Parliamentary Research Service. Available at: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/767243/EPRS_BRI%282025%29767243_EN.pdf.
24. EU adopts 18th package of sanctions against russia. European Commission. Available at: https://enlargement.ec.europa.eu/news/eu-adopts-18th-package-sanctions-against-russia-2025-07-18_en.
25. Russia's war of aggression against Ukraine: EU adopts 18th package of economic and individual measures. Council of the EU. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/07/18/russia-s-war-of-aggression-against-ukraine-eu-adopts-18th-package-of-economic-and-individual-measures/>.
26. Russia-related Sanctions. U.S. Department of the Treasury, OFAC. Available at: <https://ofac.treasury.gov/sanctions-programs-and-country-information/russia-related-sanctions>.
27. Russian Harmful Foreign Activities Sanctions. OFAC. Available at: <https://ofac.treasury.gov/sanctions-programs-and-country-information/russian-harmful-foreign-activities-sanctions/>.
28. U.S. Department of the Treasury. Treasury Intensifies Sanctions Against russia by Targeting russia's Oil Production and Exports. Available at: <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2777>.
29. July 2025 — Monthly analysis of russian fossil fuel exports and sanctions. Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). Available at: <https://energyandcleanair.org/july-2025-monthly-analysis-of-russian-fossil-fuel-exports-and-sanctions/>.
30. Tackling the russian «Shadow» Fleet: Policy Briefing. CREA. Available at: https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2024/09/State-Capture_CREA_Shadow-fleet-policy-briefing_Final_08.2024.pdf.
31. U.S. Department of State. U.S. Security Cooperation with Ukraine. Available at: <https://www.state.gov/u-s-security-cooperation-with-ukraine/>.
32. UK support to Ukraine: factsheet. GOV.UK. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-support-to-ukraine-factsheet/uk-support-to-ukraine-factsheet>.
33. Wikipedia. List of military aid to Ukraine during the russo-Ukrainian War. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_military_aid_to_Ukraine_during_the_Russo-Ukrainian_War.
34. “Finansova pidtrymka Ukrainy Evropeïmskym Soюзom. European Commission” [Financial support to Ukraine by the European Union. European Commission]. Available at: https://commission.europa.eu/topics/eu-solidarity-ukraine/eu-assistance-ukraine/eu-financial-support-ukraine_uk.
35. “Prohrama Ukrainy, pidtrymana v ramkakh Mekhanizmu rozshyrenoho finansuvannia” [Ukraine's program supported under the Extended Fund Facility. Intern. Monetary Fund (IMF)]. Available at: <https://www.imf.org/uk/News/Articles/2023/03/31/pr23101-ukraine-imf-executive-board-approves-usd-billion-new-eff-part-of-overall-support-package>.
36. Foreign assistance to Ukraine (2022–2024). PMC Research. Available at: https://www.pmcresearch.org/slider_file/a5ae67cee53315aa8.pdf.
37. Annual Results Report – 2024 Ukraine. UNHCR. Available at: <https://www.unhcr.org/sites/default/files/2025-06/Ukraine%20ARR%202024.pdf>.
38. European Parliament. Verbatim report of proceedings – Frozen russian assets (debate) – Wednesday, 12 March 2025. Available at: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/CRE-10-2025-03-12-ITM-014_EN.html.
39. Chatham House. Tightening the oil-price cap to increase the pressure on russia. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/09/tightening-oil-price-cap-increase-pressure-russia/what-wrong-current-approach-sanctions>.
40. Chatham House. The «Fortress russia» economy has adapted well to pressure. But stagflation presents an opportunity for the West. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/09/fortress-russia-economy-has-adapted-well-pressure-stagflation-presents-opportunity-west>.
41. Russia's struggle to modernize its military industry: The impact of sanctions and war. Chatham House. Available at: <https://www.chathamhouse.org/2025/07/russias-struggle-modernize-its-military-industry/impact-sanctions-and-war-and-how-opk>.

42. “Rynok zbutu rf i Kytai” [Sales market of the Russian Federation and China. UNIAN]. Available at: <https://www.unian.ua/economics/other/ryatuye-abo-peretvoryuye-na-raba-nyt-rozkrilo-shemu-torgivli-kitayu-zrosiyeyu-13077087.html>.
43. “Svitovyi bank i rosiiia” [The World Bank and Russia]. Available at: <https://www.worldbank.org/en/country/russia>.
44. “Ekonomichna perevaha Kytaiu ta viiskovyi potentsial rf” [China’s economic advantage and the military potential of the Russian Federation]. Bintel.org.ua. Available at: <https://bintel.org.ua/publication/regions/china/kitajsko-rosijskij-alyans/>.
45. “Stratehichne partnerstvo KNR–rf” [China-Russia strategic partnership]. Foreignukraines.com. Available at: <https://foreignukraines.com/2025/01/01/how-the-war-in-ukraine-strengthened-the-strategic-partnership-between-china-and-russia/>.
46. “Kytai ta obkhid sanktsii rf” [China and circumventing Russian sanctions]. Novyny.pro. Available at: <https://novyny.pro/news/ekonomika/finansovi-mahinaciji-putina-yak-kitay-dopomagaye-rosiji-obytyi-zahidni-sankciji-5254.html>.
47. Harvard Univ. Study. West, Russia and China. Available at: <https://foreignukraines.com/2024/10/09/harvard-university-published-a-study-on-how-the-west-russia-and-china-benefit-from-the-war-in-ukraine/>.

Chernega M.A., Telepa M.V.

**INTERNATIONAL SUPPORT FOR UKRAINE IN
THE CONTEXT OF ARMED AGGRESSION.
THE ROLE OF SANCTIONS IN THE MODERN
WORLD**

The article provides a comprehensive analysis of the international community’s sanctions policy towards the Russian Federation in the period 2022–2025 in the context of full-scale aggression against Ukraine. It examines the evolution of the sanctions packages imposed by the European Union, the United States, the United Kingdom and other partners, their impact on the military and economic potential of the Russian Federation, as well as the challenges associated with circumventing sanctions through third countries. Particular attention is paid to Ukraine’s sanctions policy, its integration into the global system of restrictions and its role in ensuring national security.

The geo-economic interaction between the Russian Federation and the People’s Republic of China is analyzed separately as a factor of asymmetric partnership and limited compensation for sanctions pressure. It is determined that sanctions have become not only an instrument of economic pressure, but also an element of global security, international justice and geopolitical transformation. The article has practical significance for the formation of strategies to deter aggression, restore Ukraine and strengthen sanctions control.

In 2022–2025, sanctions evolved from targeted measures to a comprehensive strategy covering finance, energy, technology, logistics and the information space. Their application has become not only an instrument of economic pressure but also a means of demonstrating global solidarity, support for Ukraine and protection of the international legal order.

The purpose of this article is to provide a comprehensive analysis of international support for Ukraine in the war, examine the role of sanctions in the modern system of international relations and assess their impact on Russia’s economy, global markets, and Ukraine’s prospects.

Keywords: *sanctions, international security, Russia, Ukraine, European Union, China, economic pressure, circumvention of sanctions, shadow fleet, frozen assets, military-industrial complex, geo-economics, international law, strategic autonomy, sanctions coalition.*

Відомості про авторів

Чернега Майя Анатоліївна

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник науково-дослідного відділу формування пріоритетних напрямів військово-технічної політики науково-дослідного управління військово-технічної політики
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0194-4989>
e-mail: nnipo@i.ua

Телепа Максим Вікторович

начальник науково-дослідного відділу формування пріоритетних напрямів військово-технічної політики науково-дослідного управління військово-технічної політики
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3573-6857>
e-mail: dtelepa1982@gmail.com

Information about the authors:

Chernega Maiia

PhD in Engineering Sciences
Senior Research Fellow of the Research Department of the Formation of Priority Areas of Military-Technical Policy of the Scientific-Research Department of the Military-Technical Policy
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0194-4989>
e-mail: nnipo@i.ua

Telepa Maksym

The Head of the Research Department of the Formation of Priority Areas of Military-Technical Policy of the Scientific-Research Department of the Military-Technical Policy
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3573-6857>
e-mail: dtelepa1982@gmail.com

Стаття прийнята до редколегії 09.01.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 623.4:681.3:629.7

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).24-32](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).24-32)**О. О. ПОЧЕЧУН**, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-0749-3317>**О. Ю. ЛАРІН**, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-6933-850X>**С. Ю. ЧВАНОВ**
<https://orcid.org/0000-0002-0794-2039>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ОСНОВНОГО БОЙОВОГО ТАНКА Т-90М «ПРОРИВ»

У статті подано результати комплексного аналізу систем захисту російського основного бойового танка Т-90М «Прорив». На основі результатів натурного дослідження, лабораторних випробувань і порівняльних даних розробників встановлені фактичні конструктивні рішення щодо бронювання, динамічного захисту, додаткових екранів та маскування. Запропоновано методіку кількісного оцінювання ефективності систем захисту із застосуванням математичного апарата «зонального підходу». Визначено інтегральні показники ефективності кожної підсистеми та комплексну оцінку живучості танка.

Ключові слова: Т-90М «Прорив», захищеність, система захисту, маскування, FPV-дрони, живучість, оцінка ефективності.

ВСТУП

Зростання ролі FPV-дронів, баражуючих боеприпасів і високоточної зброї [1] змінило парадигму систем захисту основних бойових танків (ОБТ). Починаючи з 2023 року, з початком масованого застосування FPV-дронів, у російсько-українській війні домінують удари у верхню проекцію та найменш захищені зони бортів і корми [2], що вимагає комплексного підходу до побудови захисту – не лише конструктивного, а й функціонального. Т-90М «Прорив» є найновішою модифікацією серійного російського ОБТ, що застосовується проти Сил оборони України. Проведений у статті аналіз трофейного зразка Т-90М «Прорив», який виготовлений у 2018–2019 роках, дає змогу оцінити реальний рівень технологічного розвитку російської школи танкобудування та визначити напрями вдосконалення вітчизняних ОБТ та засобів ураження [3].

Мета та завдання дослідження

Мета – визначити реальні технічні характеристики систем захисту Т-90М «Прорив» та провести порівняльну оцінку їх ефективності на основі зонального підходу.

Основні завдання:

- ідентифікувати конструктивні рішення щодо бронювання, динамічного захисту, додаткових екранів та маскування у різних спектрах випромінювання;
- визначити фактичні відмінності трофейного зразка від заявлених характеристик;
- оцінити ефективність кожної складової систем захисту за трьома рівнями (теоретичним, нормативним, практичним);
- розрахувати інтегральну оцінку ефективності систем захисту.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження систем захисту основного бойового танка Т-90М «Прорив» виконувалося у три етапи:

- огляд і фіксація конструктивних особливостей трофейного зразка;
- лабораторне дослідження компонентів систем захисту;
- аналітичне порівняння з офіційними джерелами інформації та зразками попередніх модифікацій (Т-90С).

Польовий етап

Польовий етап передбачав зовнішній огляд трофейного танка Т-90М «Прорив», стан – після бойового ураження FPV-дроном у зону моторно-трансмисійного відділення з послідуочим загорянням (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд зразка, що досліджувався

Під час огляду фіксувалися:

- геометричні параметри основного бронювання корпусу і башти;
- тип, розміщення та конфігурація кріплень складових частин динамічного захисту (товщина опорної пластини, наявність демпферів, кут нахилу);
- розміщення датчиків СПЗ та стан її пускових установок;
- наявність решітчастих (сітчастих) захисних екранів, маскувальних комплектів та їх стан після ураження;
- ознаки вторинних уражень (деформації, оплавлення, пробиття, вторинні осколки).

Лабораторний етап

Проведено лабораторне дослідження відібраних зразків:

- маскувального комплекту «Накидка» [4] – вимірювання комплексної діелектричної проникності та коефіцієнту втрат у діапазоні 2–18 ГГц на хвилеводному стенді НВЧ-5М, а також визначення ІЧ-емісії методом тепловізійного контролю за допомогою камери FLIR T540. Для оцінювання термостійкості

проведено нагрівання зразків до +180 °С протягом 30 хв. (імітація нагріву під сонячним випроміненням). Виміряно зміни відбивної здатності та теплопровідності;

- вибухової речовини (ВР) ЭГ-85Д зі складу елементів динамічного захисту (ЕДЗ) 4С23 [5] – встановлено, що до складу ВР входять гексоген, полімерна зв'язувальна речовина з пластифікатором (диоктилфталат, дибутилсебацінат). Компонентний склад ВР: гексоген – 85 %; полімерна зв'язувальна речовина – 11 %; пластифікатор – 4 %.

Аналітичний етап

Аналітичний етап полягав у зіставленні конструктивних і функціональних характеристик систем захисту танків Т-90С та Т-90М «Прорив», визначенні динаміки їх розвитку та оцінюванні ефективності окремих елементів на основі нормативних, технічних документів та інформації з відкритих джерел.

База джерел для аналізу

Перша група – відомчі технічні та нормативні документи. Як основні джерела інформації застосовувались: технічні описи та експлуатаційна документація виробника – АО «Уралвагонзавод»; технічні умови на елементи динамічного захисту 4С22; рекламно-технічні матеріали АО «НИИ Стали» по КДЗ «Контакт-5» і «Релікт», які доступні на їх сайтах. Ці документи містять офіційно підтвержені відомості щодо складу, розміщення та принципів роботи штатних систем захисту, тому мають найвищий рівень достовірності.

Друга група – міжнародні науково-технічні джерела та профільні специфікації, що визначають критерії якості та балістичної стійкості сучасної броні. Використання класифікаційного огляду 2025 року [6] разом із фундаментальним аналізом механічної металургії [7] дозволило провести верифікацію відповідності фізико-механічних характеристик сталей, що застосовуються у танках Т-90С і Т-90М вимогам західних специфікацій (зокрема серії MIL-DTL та Def Stan 95-24). Доповнення бази специфікацією MIL-DTL-46100E [8] забезпечує еталонні параметри для оцінювання балістичної стійкості броні високої твердості (ННА) та формує об'єктивну систему координат для порівняльного аналізу захищеності досліджуваних зразків.

Третя група – аналітичні та міжнародні огляди. Використано відкриті звіти провідних аналітичних центрів: RUSI (2024) Protecting the Force from Uncrewed Aerial Systems [9]; IISS (2024) The Military Balance [10]; SIPRI (2024) Armament Report [11]. Ці матеріали застосовано виключно для контекстного аналізу сучасних тенденцій розвитку бронетехніки та співвідношення технологічних підходів у системах захисту різних держав. Кількісні показники з цих джерел не використовувалися у розрахунках.

Методика порівняльного оцінювання

Для зіставлення систем захисту танків Т-90С і Т-90М «Прорив» застосовано системно-порівняльний підхід із використанням трьох рівнів проведення аналізу:

- конструктивно-геометричний рівень: порівняння товщини, маси та матеріалу бронезахисту; аналіз топології розташування ДЗ, демпферних вузлів у складі модулів ДЗ даху башти;

- функціональний рівень: оцінювання ефективності – елементів ДЗ (порівняння 4С22 та 4С23); захисних решітчастих (сітчастих) екранів; системи постановки завес і маскувального комплексу за спектральними характеристиками;

- нормативно-ефективнісний рівень: перехід від параметрів технічних описів до стандартизованих показників рівнів захисту за STANAG 4569 (Level 1-4) виключно для орієнтовного зіставлення; розрахунок еквівалентної товщини $R_{\text{екв}}$ і коефіцієнта ефективності $K_{\text{еф}} = R_{\text{екв}} / R_{\text{баз}}$.

Розрахункові співвідношення

Для порівняльної оцінки ефективності систем захисту танків Т-90С і Т-90М «Прорив» застосовано зональний підхід, у межах якого для кожної проекції і визначається відносний приріст ефективності:

$$K_{\text{еф},i} = \frac{E_{90M,i} - E_{90S,I}}{E_{90S,i}} = \frac{E_{90M,i}}{E_{90S,i}} - 1, \quad (1)$$

де $E_{90S,i}$ і $E_{90M,i}$ – еквівалентна стійкість або ймовірність зриву атаки для проекції і для Т-90С та Т-90М «Прорив» відповідно; $K_{\text{еф}}$ – відносне підвищення ефективності системи захисту у цій проекції.

Інтегральна оцінка загальної ефективності визначається як зважена сума за п'ятьма проекціями:

$$E_{\text{заг}} = \sum_i^5 \omega_i E_{90M,i}, \quad R_{\text{заг}} = \sum_i^5 \omega_i \frac{E_{90M,i}}{E_{90S,i}}, \quad (2)$$

де ω_i – нормалізовані коефіцієнти ваг за критичністю проекції і.

Коефіцієнти ω_i нормалізовано за формулою:

$$\omega_i = \frac{f_i k_i}{\sum_j^5 f_j k_j}, \quad (3)$$

де f_i – частка уражень у проекції; k_i – коефіцієнт критичності, який відображає ступінь впливу ураження проекції на боєздатність машини (втрата рухомості, вогневої потужності чи екіпажу), який визначався експертно за чотирибальною шкалою: 1 – незначний вплив (локальні пошкодження, можливість продовження руху); 2 – помірний (втрата працездатності окремих систем, часткова боєздатність); 3 – значний (втрата основних функцій); 4 – критичний (знищення або повна втрата боєздатності); При цьому сума нормалізованих коефіцієнтів $\sum \omega_i = 1$.

Отримані нормалізовані значення ω_i – лоб корпусу 0,10; башта (лоб) 0,10; борт 0,20; дах 0,40; корма 0,20 – відповідають актуальному розподілу уражень у сучасних умовах домінування FPV-дронів та атак з верхньої півсфери.

Для врахування внеску окремих підсистем (динамічний захист, демпфери, СПЗ, маскування, решітчасті екрани) ефективність за проекціями визначається як добуток часткових множників:

$$E_{90M,i} = E_i^{(0)} (1 + \Delta_{\text{ДЗ},i}) (1 + \Delta_{\text{демп},i}) (1 + \Delta_{\text{реш},i}) (1 + \Delta_{\text{СПЗ},i}) (1 + \Delta_{\text{маск},i}), \quad (4)$$

де $E_i^{(0)}$ – базова стійкість конструкції; $\Delta_{\text{ДЗ},i}$ – приріст від динамічного захисту; $\Delta_{\text{демп},i}$ – вплив демпферів

кріплення; $\Delta_{\text{реш}, i}$ – приріст від решітчастих (сітчастих) екранів; $\Delta_{\text{СПЗ}, i}$ – ефект комплексу оптико-електронної протидії; $\Delta_{\text{маск}, i}$ – зниження помітності у відповідному спектральному діапазоні.

Отримані значення $E_{90 M, i}$ та $K_{\text{еф}, i}$ використовуються для побудови інтегральної оцінки ефективності й подальшого порівняльного аналізу, результати якого наведено у табл. 2.

ОСНОВНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ У СИСТЕМАХ ЗАХИСТУ Т-90М «ПРОРИВ»

Комплекс динамічного захисту (КДЗ)

Згідно з технічними описами танка Т-90М на сайті виробника, а також матеріалами АО «НИИ Стали», танки двох модифікацій оснащуються різними комплексами динамічного захисту (КДЗ):

- Т-90С – КДЗ «Контакт-5» із ЕДЗ 4С22;
- Т-90М «Прорив» – КДЗ «Релікт» із ЕДЗ 4С23.

КДЗ розглядається як система розміщення та інтеграції ЕДЗ у конструкцію корпусу і башти, яка визначає реальну площу перекриття проєкцій та ефективність у різних ракурсах. Відмінності між КДЗ «Контакт-5» і «Релікт» наведені в табл. 1.

Таким чином, КДЗ «Релікт» є новим технічним рішенням:

- має іншу архітектуру розміщення блоків, зокрема захищає дах башти (рис. 2);
- забезпечує більш щільне перекриття бокових проєкцій і кращу ефективність проти тандемних боеприпасів;
- характеризується зміненою геометрією блоків та збільшеною енергетикою ВР ЭГ-85Д з гексогеновою основою, полімерним зв'язуючим і пластифікатором [5], що підвищує термічну стабільність і знижує ризик детонації при обстрілі кулями калібру 7,62–12,7 мм.

В конструкції блоків ДЗ, розміщених на даху башти Т-90М «Прорив», застосовані демпферні вузли кріплення (рис. 3), що забезпечує суттєве зниження переданого на основну броню ударного навантаження під час спрацювання ЕДЗ. Застосування трубчастих демпферних елементів з полімерним наповнювачем дозволяє зменшити пікове навантаження у точках кріплення орієнтовно на 20–35 %, залежно від типу елемента, температурних умов і жорсткості вузла. Це знижує ризик



а



б

Рис. 2. Установка модулей ДЗ: а – на даху; б – на лобовій проєкції башти (фото трофейного зразка)

локальної деформації даху башти, пошкодження приладів спостереження й порушення герметичності стиків. Таким чином, демпферні вузли не впливають безпосередньо на стійкість броні до ураження, але підвищують конструкційну живучість та забезпечують збереження працездатності систем та приладів, інтегрованих в конструкцію башти при багаторазовому спрацюванні ЕДЗ, а також ремонтпридатність самої системи ДЗ.

Таблиця 1. Порівняння КДЗ танків Т-90С та Т-90М «Прорив»

Ознака	«Контакт-5» (Т-90С)	«Релікт» (Т-90М)
Тип ЕДЗ	4С22	4С23
Зона перекриття корпусу	лобова частина $\pm 35^\circ$, борти до $\frac{1}{2}$ довжини корпусу	лобова частина $\pm 40^\circ$, борти до $\frac{2}{3}$ довжини корпусу
Башта	фронт і борти до $\frac{3}{4}$ висоти; дах не захищений	фронт, борти та частково дах башти (сегменти навколо люків)
Борти, корма	без штатних секцій	без штатних секцій
Кутова орієнтація секцій	45° до поверхні броні	$55-60^\circ$ для підвищення взаємодії з кумулятивним струменем
Маса комплексу	$\approx 1,5$ т	$\approx 2,0$ т
Заявлена ефективність (за матеріалами «НИИ Стали»)	зниження дії БПС/ПТКР у 1,2–1,4 рази	зниження дії БПС/ПТКР у 1,3–1,5 рази, підвищена ефективність проти тандемних БЧ



Р и с . 3. Зовнішній вигляд та геометричні розміри трубчатих демпферів (фото трофейного зразка)

Система постановки завіси (СПЗ)

На танку Т-90М «Прорив» встановлено оновлену систему постановки завіси ТШУ-1-2М, яка працює в автоматичному та напівавтоматичному режимах. СПЗ забезпечує виявлення лазерного опромінення, визначення напрямку загрози та автоматичний відстріл гранат 3Д17, що формують аерозольну завісу на дальності 50–80 м перед машиною. СПЗ інтегрована у систему управління озброєнням і синхронізована з приладами спостереження командира, що дає змогу оперативно реагувати на опромінення й автоматично створювати завісу у секторі загрози. Таке технічне рішення знижує ймовірність виявлення та прицільного ураження протитанковими засобами, які використовують напівавтоматичне наведення по лазерному променю.

На модифікації Т-90С встановлювався комплекс оптико-електронної протидії (КОЕП) ТШУ-1-7 («Штори-1»), який окрім системи виявлення лазерного опромінення та відстрілу гранат, містив інфрачервоні випромінювачі для активного засліплення приймачів наведення протитанкових керованих ракет (ПТКР). Хоча така концепція передбачала створення додаткового захисного бар'єра, практика експлуатації засвідчила, що випромінювачі мали значний демаскуючий ефект, помітний у видимому та інфрачервоному діапазонах на відстанях до кількох кілометрів. У реальних бойових умовах їхнє застосування не забезпечувало суттєвого зниження ефективності сучасних ПТКР, натомість підвищувало ризик

виявлення машини. Крім того, місця встановлення випромінювачів КОЕП були послабленими зонами в лобовій проекції башти, які не перекривались модулями ДЗ.

Відтак на Т-90М «Прорив» від активних ІЧ-випромінювачів відмовилися, зосередившись на удосконаленні автоматизованої СПЗ. Це рішення зменшило демаскуючі ознаки танка, одночасно забезпечивши збереження базових функцій виявлення опромінення та оперативного маскування у разі загрози. Таким чином, еволюція КОЕП від «Штори-1» до автоматизованої СПЗ ТШУ-1-2М свідчить про зміну пріоритетів – від активної протидії до зниження помітності й підвищення живучості машини в умовах тотального багатоспектрального спостереження.

Маскувальний комплект «Накидка» (рис. 4, 5)

За результатами лабораторних випробувань [4], маскувальний комплект «Накидка» забезпечує зменшення ефективної площі розсіювання (ЕПР) у радіолокаційному діапазоні на 6–8 дБ, що відповідає зниженню відбитого сигналу приблизно у 4–6 разів. Одночасно зафіксовано зменшення теплового контрасту поверхні машини в інфрачервоному діапазоні до $\Delta T \leq 2^\circ \text{C}$. Ці результати підтверджують ефективність покриття у радіолокаційному та тепловому спектральних діапазонах. Вплив зазначених показників на ймовірність виявлення залежить від характеристик конкретних датчиків (чутливість, частотний діапазон, алгоритми обробки сигналу, умови фону). Для датчиків, що працюють поблизу порога детектування, таке зниження ЕПР та ΔT може призводити



Рис. 4. Трофейний танк Т-90М «Прорив» зі спеціальним маскувальним комплектом «Накидка» (фото з відкритих джерел)

до помітного зменшення ймовірності виявлення, однак для універсальної кількісної оцінки потрібні цільові полігонні випробування або моделювальні дослідження.

Елементи пасивного захисту

На танку Т-90М «Прорив» конструктивно реалізовано низку пасивних елементів захисту:

- решітчасті екрани у кормовій частині корпусу й башти – призначені для зниження ефективності кумулятивних боєприпасів (РПГ, ПТКР, FPV) під час ураження у відповідні проєкції;
- сітковий екран над погоном башти – захищає зону з'єднання башти з корпусом від ураження кумулятивними боєприпасами;
- бортовий захист, який представляє собою 6-сегментний багат шаровий екран, який складається із зовнішньої 10-мм сталеві пластини, 2–3 шарів гуми товщиною 10 мм та 2-мм металеві підкладки.

Крім того, на багатьох танках Т-90М «Прорив» у зоні бойових дій (у т. ч. і трофейному) фіксується встанов-

лення «нештатних» металевих решітчастих «мангалів» над дахом башти для протидії FPV-дронам і барражуючим боєприпасам. Такі конструкції не передбачені технічною документацією і встановлюються у підрозділах зс рф самостійно.

ЗОНАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ Т-90М «ПРОРИВ» ПОРІВНЯНО З Т-90С

Мета та методичний підхід

Метою аналізу є кількісне визначення приросту ефективності систем захисту танка Т-90М «Прорив» відносно варіанта Т-90С за зональним підходом. Розрахунок здійснювався за формулами 1-4, з використанням нормалізованих вагових коефіцієнтів та узагальнених показників ефективності для п'яти основних проєкцій (лоб корпусу, лоб башти, борт, дах башти, корма). Результати розрахунку наведені в табл. 2 та рис. 5.

Оцінювання базується на даних технічних описів та інструкцій з експлуатації танка Т-90М на сайті виробника, матеріалах науково-технічної експертизи ЦНДІ ОВТ ЗС України [3], дослідженнях спеціального маскувального комплексу «Накидка» [4] та ВР зі складу ЕДЗ 4С23 [5]. Усі розрахунки мають аналітичний характер, похибка оцінки становить $\pm 10\text{--}15\%$.

Інтегральна оцінка та тенденції

Інтегральна оцінка комплексної ефективності (розрахована за формулою 2) становить $\approx 0,36\text{...}0,38$ з довірчим інтервалом $\pm 0,05$. Найбільший приріст забезпечено у верхній півсфері (дах башти) завдяки впровадженню КДЗ «Релікт» з елементами 4С23 та демпферної системи кріплення блоків. Лобові та бортові проєкції отримали помірне посилення, а кормова залишається найменш захищеною.

Внесок інших складових системи захисту

Демпферні вузли кріплення елементів динамічного захисту знижують передане на бронекорпус ударне навантаження під час спрацювання ЕДЗ. Використання трубчатих демпферів з полімерним наповнювачем дає змогу зменшити пікове навантаження у місцях кріплення на 20...35%, що знижує ризик деформації даху башти та пошкодження оптичних приладів. Цей ефект не

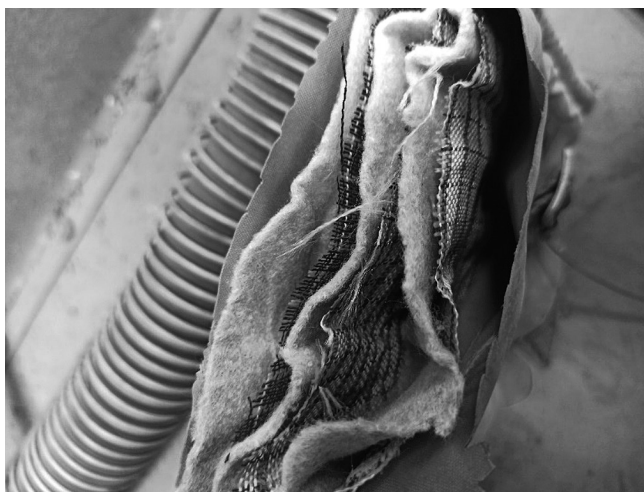


Рис. 5. Фрагменти спеціального маскувального комплексу «Накидка»

Таблиця 2. Оцінка приросту ефективності систем захисту танка Т-90М «Прорив»

№	Проекція	Відносна ефективність $E_{90M,i}$	Характер зміни	Основні фактори впливу	Рівень достовірності
1	Лоб корпусу	$\approx 1,0$ (0,95–1,1)	мінімальна	аналогічний бронепакет; частковий перерозподіл модулів з ЕДЗ 4С23	А–В
2	Башта (лоб)	$\approx 1,1$ (1,05–1,2)	помірне покращення	оптимізація розміщення та кутів встановлення модулів ДЗ; застосування ЕДЗ 4С23; застосування сітки для захисту погона башти; вилучення елементів КОЕП, місце яких перекрито ДЗ	В
3	Дах башти (верхня півсфера)	$\approx 1,45$ (1,3–1,6)	значне	встановлення модулів ДЗ із демпферними вузлами та ЕДЗ 4С23; пасивні сітки над погоном; нештатний «мангал»	А–В
4	Борт	$\approx 1,1$ (1,0–1,15)	помірне	збільшена площа перекриття КДЗ за рахунок встановлення додаткових модулів у тканинних чохлах; застосування решітчастих екранів в зоні МТВ та сітчастих – для прикриття погону	В
5	Корма	$\approx 1,0$ (0,95–1,05)	без змін	аналогічно Т-90С тонкий бронеліст; решітчасті екрани, у т. ч. на тильній проекції башти	В

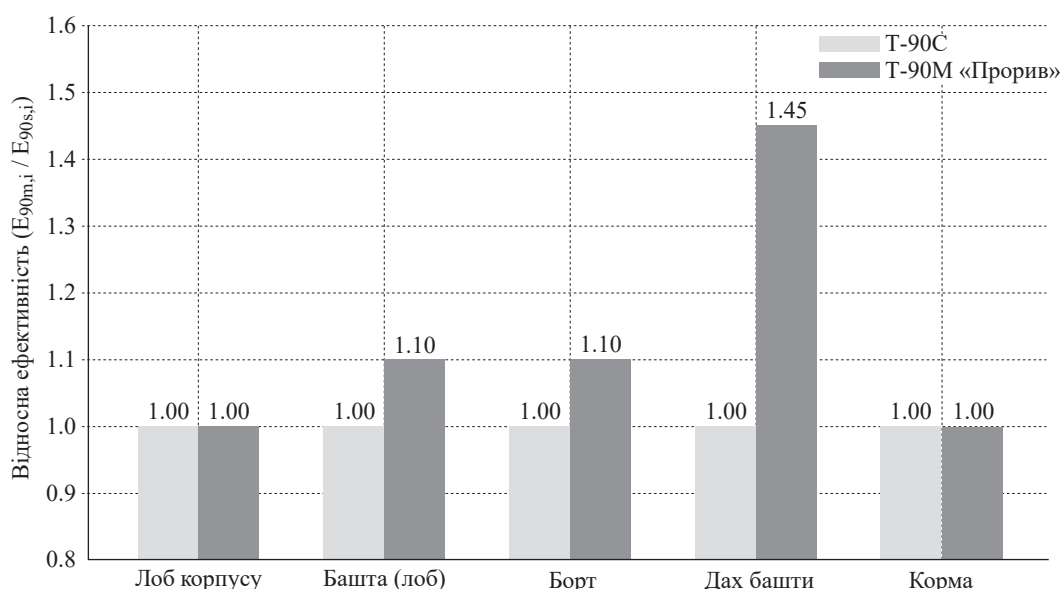


Рис. 5. Приріст ефективності захисту Т-90М «Прорив» у порівнянні з Т-90С

впливає безпосередньо на бронестійкість, але підвищує конструкційну живучість машини.

СПЗ ТШУ-1-2М, інтегрована до складу системи управління озброєнням, забезпечує виявлення лазерного опромінення, визначення напрямку загрози та автоматичний відстріл гранат ЗД17, які формують аерозольну завісу на дальності 50...80 м. Така завіса створює перешкоду для засобів наведення у лазерному та частково інфрачервоному діапазонах. Відмова від інфрачервоних випромінювачів (характерних для комплексу ТШУ-1-7 на Т-90С) зменшила демаскуючі ознаки, при цьому зберігши можливість швидкої реакції на опромінення. Узагальнено, внесок системи у зниження ймовірності прицільного ураження оцінюється на рівні 5...15 % в залежності від типу загрози та умов спостереження.

Маскувальний комплект «Накидка» підвищує ефективність маскування машини за рахунок зниження ефективної площі розсіювання (ЕПР) у радіолокаційному діапазоні на 6...8 дБ (зменшення відбитого сигналу у 4–6 разів) і теплового контрасту в інфрачервоному

діапазоні до $\Delta T \leq 2$ °С. Це зменшує дальність і ймовірність виявлення танка в умовах тотального багатоспектрального спостереження на сучасному полі бою. Вплив зазначених характеристик на фактичну ймовірність виявлення залежить від типу датчиків і умов фону, але в окремих випадках може забезпечувати зниження на десятки відсотків.

Загалом, сукупна дія інших складових системи захисту формує додатковий приріст ефективності комплексного захисту на рівні 10...15 % відносно базового стану (Т-90С), головним чином за рахунок зменшення демаскуючих ознак та ймовірності повторного наведення.

Узагальнення

Порівняльний аналіз підтверджує, що головне конструктивне вдосконалення Т-90М «Прорив» порівняно з Т-90С полягає у впровадженні КДЗ «Релікт» з ЕДЗ 4С23, збільшенні площі перекриття верхньої півсфери і демпферного кріплення блоків. Сукупно ці рішення забезпечили помітне зростання зональної ефективності захисту, насамперед, у ділянці даху башти, де зафіксо-

вано найбільший приріст живучості. Лобові та бортові проєкції отримали помірне підсилення завдяки оновленій компоновці блоків ДЗ і застосуванню елементів пасивного захисту.

Разом з тим, результати аналізу технічної документації танків Т-90М і Т-90С та проведених досліджень [3] свідчать про відсутність у складі серійного Т-90М «Прорив» повноцінних комплексів активного захисту (КАЗ) і бортових засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Найвні системи мають переважно пасивний характер протидії, тоді як активна складова представлена лише системою постановки завіс ТШУ-1-2М, яка виконує функцію маскуванню, але не забезпечує кінетичного перехоплення загроз. Це суттєво обмежує потенціал танка у протидії сучасним високоточним засобам ураження, зокрема БпЛА, керованим боеприпасам і ПТКР, які атакують з верхньої півсфери.

Таким чином, підвищення живучості Т-90М «Прорив» досягнуто насамперед за рахунок удосконалення динамічного захисту та оптимізації технічних та конструктивних рішень, тоді як нові активні технології – КАЗ, РЕБ та інтеграція всіх систем у єдину архітектуру комплексного захисту у серійному виконанні практично відсутні.

ВИСНОВКИ

Проведений порівняльний аналіз підтвердив зростання рівня живучості танка Т-90М «Прорив» порівняно з Т-90С, насамперед завдяки впровадженню сучасного комплексу динамічного захисту «Релікт» з елементами 4С23 та реалізації конструктивних рішень, спрямованих на зменшення вразливості верхньої півсфери. Водночас результати аналізу свідчать про вкрай обмежений розвиток активної складової захисту: у серійному виконанні встановлюється лише СПЗ ТШУ-1-2М, повноцінні КАЗ і бортові засоби РЕБ відсутні, що знижує потенціал машини у протидії сучасним загрозам.

Запропонована модель кількісної оцінки ефективності систем захисту бронетехніки на основі зонального підходу дозволяє комплексно враховувати частоту та критичність уражень, конструктивні особливості різних проєкцій машини, а також внесок окремих підсистем – динамічного та пасивного захисту, демпферних вузлів, системи постановки завіс і засобів маскуванню. Її використання дає можливість об'єктивно порівнювати однотипні зразки різних поколінь і визначати реальний приріст живучості без залучення неперевіраних або оціночних даних.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розвиток методичного апарату зонального підходу – уточнення математичних залежностей, розширення набору характеристик, які враховують інтегровану взаємодію підсистем, та створення розрахунково-експериментальної бази для повної верифікації моделі. Наступним етапом має бути застосування цієї методики для оцінювання ефективності комплексованих систем захисту, що поєднують активні, динамічні та пасивні елементи у єдиній архітектурі живучості бойових броньованих машин.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Міністерство оборони України. Аналітична довідка щодо впливу БпЛА на бойові дії. Київ: МОУ. 2024. 27 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mil.gov.ua/diyalnist/analitichni-materiali.html> (дата звернення: 20.09.2025).
2. Почечун О.О., Чванов С.Ю., Карпенко О.С. Еволюція загроз для бронетанкової техніки на сучасному полі бою. 36. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2023. Вип. 4 (91). С. 76—80.
3. ЦНДІ ОБТ ЗС України. Звіт за результатами проведення науково-технічної експертизи основного бойового танка Т-90М «Прорив». Інв. № 40 н/т. Київ. 2025. 84 с.
4. Військова частина А4629. Звіт за результатами досліджень фрагменту спеціального маскувального комплексу «Накидка» трофейного зразка російського танка Т-90М «Прорив». Київ. 2023. 27 с.
5. Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство хімічних продуктів». Звіт-довідка за результатами дослідження хімічного складу порохів і вибухових речовин із зразків російського озброєння. Роботи виконані на підставі службової записки 12/09-01 від 29.04.22. Шостка. 2024. 27 с.
6. Basmacı, M. & Saklakoglu, I. E. (2025). Classification of modern armor steels, history, material properties and heat treatment procedures. *Machines, Technologies, Materials: Intern. Scient. J. Iss. 3*. Pp. 105–110. <https://doi.org/10.55630/mtm.2025.3.105>.
7. Cimpoeu, S. J. (2016). *The Mechanical Metallurgy of Armour Steels*. Victoria: Defence Science and Technology Group. 58 p. (Report No. DST-Group-TR-3305).
8. U.S. Department of Defense. MIL-DTL-46100E (MR): Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness. Washington, D.C.: U.S. DoD, 2008. 22 p.
9. Watling, J. & Bronk, J. (2024). *Protecting the Force from Uncrewed Aerial Systems*. London: Royal United Services Inst. (RUSI). 42 p.
10. IISS. *The Military Balance 2024*. London: Routledge. Intern. Inst. for Strategic Studies. 2024. Available at: <https://www.iiss.org/publications/the-military-balance/2024/the-military-balance-2024> (дата звернення: 20.10.2025).
11. SIPRI. *Armament Report 2024*. Stockholm: Stockholm Intern. Peace Research Inst. 2024. Available at: <https://www.sipri.org/yearbook/2024> (дата звернення: 21.10.2025).

REFERENCES

1. “Ministerstvo obrony Ukrainy. Analitichna dovidka shchodo vplyvu BpLA na boiovi dii” [Analytical brief on the impact of UAVs on combat operations]. K.: Ministry of Defense of Ukraine. 2024. 27 p. Available at: <https://www.mil.gov.ua/diyalnist/analitichni-materiali.html> (accessed: Sept., 20. 2025).
2. Pochechun, O.O., Chvanov, S.Yu. & Karpenko, O.S. (2023). “Evolutsiia zahroz dlia bronetankovoi tekhniki na suchasnomu poli boiu” [Evolution of threats to armored vehicles on the modern battlefield]. *Coll. of Scient. Works of the Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. № 4(91)*. Pp. 76—80.

3. TsNDI OVT ZS Ukrainy. "Zvit za rezultatamy provedennia naukovo-tekhnichnoi ekspertyzy osnovnoho boiovoho tanka T-90M «Proryv»" [Report on the results of the scientific and technical examination of the T-90M «Proryv» main battle tank]. Inv. No. 40 NT. K. 2025. 84 p.
4. Viiskova chastyna A4629. "Zvit za rezultatamy doslidzhen frahmentu spetsialnoho maskovalnoho komplektu «Nakydka» trofeinoho zrazka rosiiskoho tanka T-90M «Proryv»" [Report on the results of the study of a fragment of the special camouflage set «Nakydka» from a captured russian T-90M «Proryv» tank]. K. 2023. 27 p.
5. Tovarystvo z обмеженоiu vidpovidalnistiu «Naukovo-vyrobnyche pidpriemstvo khimichnykh produktiv» "Limited Liability Company «Scientific-Production Enterprise of Chemical Products». Zvit-dovidka za rezultatamy doslidzhenia khimichnoho skladu porokhiv i vybukhovyykh rechovyn iz zrazkiv rosiiskoho ozbroiennia. Roboty vykonani na pidstavi sluzhbovoi zapysky 12/09-01 vid 29.04.2022" [Report–Summary of the study of the chemical composition of propellants and explosive materials from samples of russian armament. Work performed on the basis of service note 12/09-01 dated 29 Apr. 2022]. Shostka: LLC «Scientific-Production Enterprise of Chemical Products». 2024. 6 p.
6. Basmaci, M. & Saklakoglu, I. E. (2025). Classification of modern armor steels, history, material properties and heat treatment procedures. *Machines, Technologies, Materials: Intern. Scient. J. Iss. 3*. Pp. 105–110. <https://doi.org/10.55630/mtm.2025.3.105>.
7. Cimpoeu, S. J. (2016). *The Mechanical Metallurgy of Armour Steels*. Victoria: Defence Science and Technology Group. 58 p. (Report No. DST-Group-TR-3305).
8. U.S. Department of Defense. MIL-DTL-46100E (MR): Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness. Washington, D.C.: U.S. DoD. 2008. 22 p.
9. Watling, J. & Bronk, J. (2024). *Protecting the Force from Uncrewed Aerial Systems*. London: Royal United Services Inst. (RUSI). 42 p.
10. IISS. *The Military Balance 2024*. London: Routledge. Intern. Inst. for Strategic Studies. 2024. Available at: <https://www.iiss.org/publications/the-military-balance/2024/the-military-balance-2024> (accessed: 20.10.2025).
11. SIPRI. *Armament Report 2024*. Stockholm: Stockholm Intern. Peace Research Inst. 2024. Available at: <https://www.sipri.org/yearbook/2024> (accessed: 21.10.2025).

**Pochechun O.O., Larin O.Yu.,
Chvanov S.Yu.**

**COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE
PROTECTION SYSTEMS OF THE T-90M
«PRORYV» MAIN BATTLE TANK**

The article presents the results of a comprehensive technical and comparative analysis of the protection systems of the russian T-90M «Proryv» main battle tank, based on the study of a captured specimen and laboratory tests of its individual components. The research aimed to identify the actual technical configuration of the dynamic, passive, and auxiliary protection systems, evaluate their efficiency using

a zonal approach, and determine the real technological advancement of the russian tank protection school relative to previous generations.

The analysis revealed that the primary improvement of the T-90M compared to the T-90S lies in the implementation of the «Relikt» explosive reactive armor (ERA) with 4S23 explosive elements, which ensures expanded coverage of the upper hemisphere and improved protection against tandem-charge warheads. Laboratory studies of the 4S23 composition confirmed the use of an RDX-based explosive with polymer binder and plasticizer, providing higher thermal stability and reduced sensitivity to small-caliber impacts. The use of damping assemblies for mounting ERA blocks significantly reduces shock loads on the turret roof, increasing the vehicle's structural survivability. Complementary systems such as the TShU-1-2M smoke-screening system and the «Nakidka» camouflage kit contribute to lowering detection probability in optical, infrared, and radar spectra.

Quantitative evaluation based on the zonal efficiency model demonstrated an integrated protection improvement of approximately 35–40 % relative to the T-90S, primarily due to the enhanced protection of the turret roof area. However, the study also indicates the absence of full-fledged active protection systems (APS) and onboard electronic countermeasures (ECM) in production T-90M tanks, which limits their resistance to modern high-precision threats such as top-attack munitions and FPV drones.

The developed zonal assessment methodology enables objective comparison of armored vehicles across generations, taking into account the frequency and criticality of hits on different projections and the contribution of individual subsystems. The findings provide a scientific basis for future R&D on integrated protection architectures combining active, dynamic, and passive elements to enhance the overall survivability of armored combat vehicles.

***Keywords:** T-90M «Proryv», protection level, protection system, camouflage, FPV drones, survivability, effectiveness assessment.*

Відомості про авторів:

Почечун Олександр Олександрович

начальник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки бронетанкових, механізованих та високомобільних військ науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0749-3317>
e-mail: gjtxey1974@gmail.com

Ларін Олександр Юрійович

начальник науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ Україна

<https://orcid.org/0000-0001-6933-850X>
e-mail sanlarin@ukr.net

Чванов Сергій Юрійович

старший науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки бронетанкових, механізованих та високомобільних військ 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/0000-0002-0794-2039>
e-mail: ychvanov@ukr.net

Information about the authors:

Pochechun Olexandr

Head of the Research Section for the Development of Armoured, Mechanized and High-Mobility Forces Weaponry and Equipment, Research Department for the Development of Army Weaponry and Equipment, Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-0749-3317>
e-mail: gjxtxey1974@gmail.com

Larin Olexandr

Head of Directorate for Scientific Research of Armament and Military Equipment of the Army of 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@ukr.net

Chvanov Sergii

Senior Research Officer
Research Department for the Development of Army Weaponry and Equipment
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0794-2039>
e-mail: ychvanov@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 10.12.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 623.746-519

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).33-39](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).33-39)

В. І. СІЛКОВ, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-4446-212X>

А. Л. ЗІРКА, кандидат технічних наук
старший дослідник
<https://orcid.org/0000-0001-5304-2894>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

К. М. ТОРХОВ
(«Адрон DAM», м. Київ)

М. В. БУРТИН
(АТ «Антонов», м. Київ)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ І ЛЬОТНО-ТАКТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРОВАНОЇ АВІАЦІЙНОЇ БОМБИ В ЛЬОТНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ

У статті викладена методика розрахунку дальності польоту бомби, яка оснащена крилом і турбореактивним двигуном. Запропоновано робочі формули для оцінок різних варіантів характеристик: у повній конфігурації, а також за рахунок двигуна та за рахунок крила.

Застосування енергетичного метода динаміки польоту дозволило одержати залежності приросту дальності планування бомби за рахунок величини тяги двигуна та часу його роботи. Показано, що оснащення бомби крилом і двигуном здатне у багато разів перевищити дані, що були отримані шляхом підвищення аеродинамічної якості.

Показано, що встановлення двигуна дозволяє зменшити кут нахилу траєкторії планування бомби на величину, яка пропорційна відношенню тяги до сили тяжіння авіаційної бомби.

Ключові слова: авіаційна бомба, планування авіаційної бомби, керована авіаційна бомба, траєкторія польоту, аеродинамічна якість, дальність польоту, турбореактивний двигун.

ВСТУП

Розвиток та вдосконалення планеруючих авіаційних бомб призвело до перегляду та суттєвих змін у тактиці бойового застосування літаків-бомбардувальників (ударних тактичних літаків). Збройне протистояння в ході відбиття агресії РФ проти України відрізняється від попередніх збройних конфліктів безпрецедентним масовим застосуванням безпілотних літальних апаратів (БпЛА) і планеруючих керованих авіаційних бомб. Це обумовлено двома причинами: суттєвим підвищенням

бойових властивостей засобів ППО противника та недостатньою дальністю польоту вільнопадаючих бомб у штатній конфігурації [1, 4].

Модернізація некерованих авіаційних бомб з метою збільшення дальності польоту призвела до необхідності її оснащення рульовими поверхнями та виконавчими механізмами системи керування і комплекту моторного планування (КМПК) та перетворення її на планеруючу керовану авіаційну бомбу (ПКАБ).

КМПК надавалися функції управління траєкторією польоту ПКАБ з використанням супутникового зв'язку, а також функції стабілізації і задачі покращення стійкості, керованості бомби. Таким чином, звичайна авіаційна бомба перетворювалася у безпілотний керований літальний апарат [2, 3].

Розуміння особливостей функціонування ПКАБ дозволить обґрунтовано визначати технічні вимоги до такого засобу ураження.

Метою статті є відпрацювання робочого науково-методичного апарату з оцінювання аеродинамічних характеристик та льотно-тактичних даних сучасної ПКАБ.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

До ПКАБ висуваються основні вимоги: ударна міць, точність влучання і дальність планування. Ударна міць ПКАБ оцінюється величиною тротилового еквівалента, дальність польоту – аеродинамічною якістю і досконалістю встановлених двигуна і крила, а ефективність застосування – точністю влучання.

Запас енергії бомба отримує від літака-носія в момент її скидання. Цей запас необхідно перетворити у дальність польоту. Як це зробити, йдеться у даному матеріалі.

Некеровані авіаційні бомби попередніх поколінь мали порівняно невелику дальність польоту. При невеликих дальностях штурману було складно здійснити наведення літака і точне прицілювання на ціль. З розвитком засобів навігації та прицільних систем дальності скидання авіаційних бомб поступово збільшувались, а висота польоту носія під час скидання стала визначатися особливим коридором. Для унеможливлення входу літака-носія в зону дії засобів ППО противника вона має бути або гранично малою, або не нижчою за деяку велику висоту [4].

Звичайна (вільнопадаюча) авіаційна бомба відрізняється невеликою величиною аеродинамічної якості (звичай у межах 1–2 одиниць). Її збільшення за рахунок вдосконалення аеродинаміки корпусу бомби повністю себе вичерпало. Залишається одна можливість – оснащення бомби крилом та двигуном.

Між тим, можливості крила обмежені. У складеному положенні воно повинно вписуватися у габарити бомби, тому розмах крила не повинний перевищувати довжину корпусу бомби. Хорда крила також обмежується: при значній хорді крило виступає за обводи корпусу, порушується його профіль і збільшується мідель, що приведе до росту лобового опору бомби та зниженню її аеродинамічної якості. Всі ці недоліки вимагають пошуку інших варіантів.

Альтернативним варіантом крилу є установка на корпус бомби реактивного двигуна з паливним баком. В деяких випадках застосовується комплексний варіант – крило + двигун.

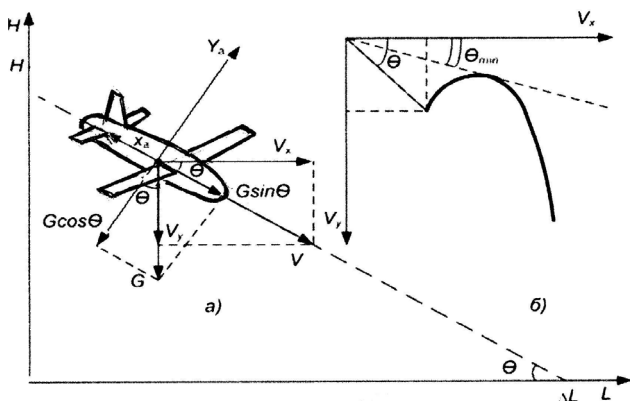
Таким чином, сучасна ПКАБ – це новітній і ефективний зразок озброєння, який необхідно терміново впроваджувати і вдосконалювати. Розглянемо більш докладно означені варіанти.

Визначення дальності польоту бомби

У сталому планеруванні ПКАБ лобовий опір X_a врівноважується складовою сили тяжіння $G \sin \theta$, а прямолінійність руху забезпечується рівністю підйомної сили Y_a і складовою $G \cos \theta$ (рис. 1, а):

$$\begin{aligned} X_a &= -G \sin \theta, \\ Y_a &= G \cos \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

де θ – кут нахилу траєкторії планування бомби, $G = gm$ – сила тяжіння бомби.



Р и с . 1. Схема сил, що діють на бомбу у вертикальній площині

Таким чином, кут планування θ визначається однозначно аеродинамічною якістю ЛА K . Найменший кут відповідає максимальній якості.

З приведеного рисунка можна отримати зв'язок між висотою і дальністю планування:

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} = -\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{K} \quad \text{або} \quad \Delta L = K \Delta H, \quad (3)$$

де ΔH – витрачена висота за час планерування.

З формули (3) слідує, що максимальну дальність можна одержати при максимальній аеродинамічній якості.

Шляхом ділення даних рівнянь (1) одного на друге отримуємо:

$$\operatorname{tg} \theta = -\frac{X_a}{Y_a} = -\frac{C_{xa}}{C_{ya}} = \frac{1}{K}. \quad (2)$$

Відомо, що K_{max} відповідає найвигіднішому коефіцієнту підйомної сили $C_{y_{ув}}$ [5, 6]. Найвигідніша швидкість, у свою чергу, також відповідає найвигіднішому коефіцієнту підйомної сили $C_{y_{ув}}$. При цьому швидкість може бути істинною V , індикаторною V_i або приладовою V_{np} .

Швидкість польоту отримаємо з другого рівняння системи (1):

$$Y_a = C_{ya} \rho V^2 S / 2 = G \cos \theta.$$

Звідси

$$V_{np} = \sqrt{\frac{2gm}{C_{y_{ув}} \rho_0 S}}. \quad (4)$$

У формулі (4) прийнято $\cos \theta \approx 1$ як для малого кута нахилу траєкторії. Слід зауважити, що приладова швидкість відрізняється від індикаторної тільки величиною поправок для конкретної системи вимірювання швидкості $V_{np} = V_i - \delta V$, де δV – помилка вимірювання швидкості. Нагадаємо, що індикаторна швидкість однозначно зв'язана з швидкісним напором $q = \rho_0 (V_i)^2 / 2$. У силу малості поправок δV на практиці використовують рівність $V_{np} \approx V_i$.

Перевагою індикаторної і приладової швидкостей є їх незалежність від висоти польоту [6]. При їх обчисленні щільність повітря приймається для нульової висоти $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$.

Якщо $V_{np} = \text{const}$, то швидкісний напір зберігається незмінним. Але при розрахунку дальності польоту необхідно використовувати істинну швидкість (відносно землі) та щільність реальної атмосфери ρ . Зв'язок між істинною та приладовою швидкостями можна записати у виді:

$$V = V_i / \sqrt{\Delta}, \quad V_i = V_{np} + \delta V. \quad (5)$$

Відношення ρ_H / ρ_0 звичайно позначають через Δ , а δV – сумарна поправка до показника швидкості [6]. При зниженні бомби з постійною приладовою швидкістю істинна швидкість буде зменшуватися і на висоті $H = 0$ вони стають рівними.

Визначення максимальної аеродинамічної якості ПКАБ

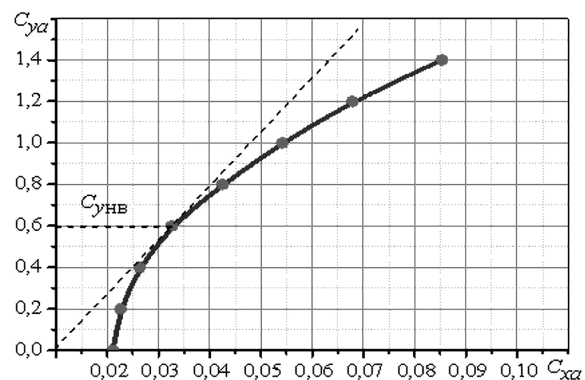
Із формули (3) видно, що визначальним параметром дальності польоту ПКАБ є її аеродинамічна якість. На практиці використовують декілька способів оцінки аеродинамічної якості:

- продувкою моделі ПКАБ в аеродинамічній трубі;
- розрахунком за діючими методиками;
- льотним експериментом натурної ПКАБ.

Розглянемо особливості кожного із даних методів.

Для продувки в трубі розробляють продувочну модель ПКАБ. Вона повинна бути геометрично подібною своєму аналогу.

Модель продувають у трубі і визначають діючі сили і моменти в залежності від кута атаки. За силами і моментами розраховують відповідні коефіцієнти даних сил і моментів $C_x(\alpha)$, $C_y(\alpha)$. Ці залежності моделі і її аналогу повинні бути однаковими. Вони також дозволяють побудувати полярю $C_{xa}(C_{ya})$. Приклад такої залежності наведений на рис. 2.



Р и с . 2. Приклад полярю ПКАБ

Поляр застосовується для розрахунку багатьох льотних характеристик і, перш за все, лобового опору та аеродинамічної якості. У будь-якій точці поляр можна визначити відношення C_{ya}/C_{xa} , тобто аеродинамічну якість. Максимальну якість можна визначити тангенсом кута нахилу дотичної лінії, що проведена з початку координат до кривої $C_{ya}(C_{xa})$. Точка торкання відповідає найвигіднішому коефіцієнту підйомної сили, а саме і максимальній якості [6].

Основною проблемою даного методу є використання досить дорогої аеродинамічної труби та дорогої моделі.

Розрахункові методи високого рівня з визначення аеродинамічної якості вимагають застосування комп'ютерної та складання складних програм. Найбільш доступним і точним методом визначення аеродинамічних характеристик є льотний експеримент. У ньому в якості моделі може бути використаний безпосередньо сам об'єкт досліджування – ПКАБ зі штатним вимірювальним обладнанням, що дозволяє реєструвати горизонтальну V_x та вертикальну V_y швидкості польоту, геометричну висоту, кути крену, курсу та ін.

Задачею експерименту є виконання «площадок» з постійним кутом зниження і витримуванням постійної швидкості протягом 10...20 с.

Виконавши такі «площадки» на швидкостях $V_{min}, V_1, V_2, \dots, V_{max}$, будують залежності від швидкості: θ, V_y, K за формулами:

$$\frac{V_y}{V_x} = -\operatorname{tg}\theta = \frac{1}{K} \quad \text{або} \quad V_y = \frac{V_x}{K} \approx \frac{V}{K}. \quad (6)$$

Із рис. 1,б видно, що співвідношення вертикальної і горизонтальної швидкостей також можна знайти через аеродинамічну якість.

Наближена рівність свідчить про те, що горизонтальна складова швидкості V_x є близькою до швидкості по траєкторії V в силу малості кута зниження θ між ними. Це дає підставу стверджувати, що в прямолінійному сталому зниженні вертикальна швидкість у K разів менша траєкторної швидкості. Використовуючи цю властивість, можна побудувати поляр швидкостей (рис. 1,б). Дотична до неї визначить мінімальний кут зниження і найвигідніший режим польоту. Звідси вертикальну швидкість можна знайти як $V_y = V/K$.

Максимальна аеродинамічна якість бомби з крилом дозволяє визначити її максимальну дальність польоту.

Оцінка впливу тяги двигуна на дальність польоту бомби

При наявності двигуна на бомбу діє додаткова сила тяги P , та додаткова сила ΔG_{cy} – сила тяжіння силової установки і палива для двигуна [7]. Тобто сила тяжіння бомби з двигуном зростає до $G_{\text{дв}} = G + \Delta G_{cy}$. Тоді перше рівняння системи (1) приймає вид:

$$X_a = P - G_{\text{дв}} \sin \theta_{\text{дв}}, \quad (7)$$

де $\theta_{\text{дв}}$ – кут зниження бомби з працюючим двигуном. Для підвищення дальності польоту бомби з двигуном встановлюють додаткові паливні баки: її злітна маса може суттєво зрости. Крім того, паливні баки підви-

щують площу міделя ПКАБ, її аеродинамічна якість зменшується. Це веде до погіршення початкових характеристик модернізованої бомби.

Рівняння (2) після установки двигуна приймає вид:

$$Y_a = G_{\text{дв}} \cos \theta_{\text{дв}}. \quad (8)$$

Поділивши (7) на (8), одержимо

$$\frac{1}{K} = \frac{P - G_{\text{дв}} \sin \theta_{\text{дв}}}{G_{\text{дв}} \cos \theta_{\text{дв}}} = \frac{P}{G_{\text{дв}} \cos \theta_{\text{дв}}} - \operatorname{tg} \theta_{\text{дв}}. \quad (9)$$

З порівняння (9) і (2) приходимо до висновку, що силова установка підвищує дальність польоту бомби через зменшення кута планування.

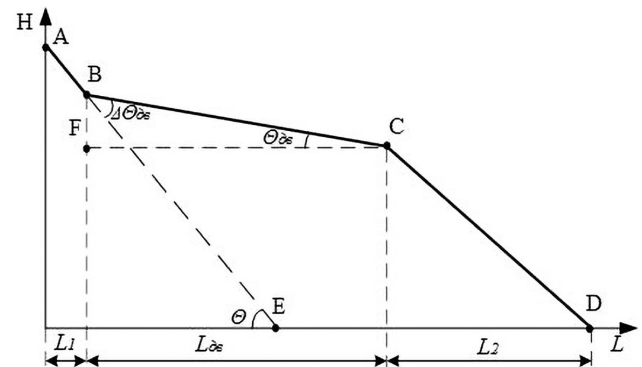


Рис. 3. Траєкторія планування авіаційної бомби

Слід зауважити, що зміна конфігурації авіаційної бомби за рахунок власно двигуна та паливного бака декілька підвищує її лобовий опір і зменшує максимальну аеродинамічну якість. Планування виконується на невеликих кутах, тому можна прийняти допущення, що $\cos \theta_{\text{дв}} \approx 1$ і записати рівняння (9) у виді:

$$\operatorname{tg} \theta_{\text{дв}} = -\left(\frac{1}{K} - \frac{P}{G_{\text{дв}}} \right). \quad (10)$$

По аналогії з формулою (3) дальність польоту бомби з працюючим двигуном можна записати у виді:

$$L_{\text{дв}} = \frac{\Delta H}{\operatorname{tg} \theta_{\text{дв}}}, \quad (11)$$

де ΔH – витрата висоти за час роботи двигуна. При малих кутах допустимо замінювати $\operatorname{tg} \theta$ самим кутом у радіанах, тоді можна записати $\operatorname{tg} \theta_{\text{дв}} = \theta_{\text{дв}} = \theta - \Delta \theta_{\text{дв}} = 1/K - P/G_{\text{дв}}$. Порівнюючи цю різницю з формулою (8), одержимо:

$$\Delta \theta_{\text{дв}} = P/G_{\text{дв}} \text{ рад} = 57,3 P/G_{\text{дв}} \text{ град}. \quad (12)$$

Приріст дальності польоту за рахунок працюючого двигуна дорівнює:

$$\Delta L_{\text{дв}} = \frac{\Delta H}{\operatorname{tg} \Delta \theta_{\text{дв}}} - \frac{\Delta H}{\operatorname{tg} \theta} = \Delta H \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \Delta \theta_{\text{дв}}} - \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \right). \quad (13)$$

Двигун за запасом палива має обмежений час роботи і встає питання, на якій частині траєкторії його потрібно включати: одразу після скидання бомби або наприкінці. Іншими словами, де він надає ПКАБ найбільшу енергію. Загальна питома енергія ПКАБ оцінюється величиною

$$H_e = H + \frac{V^2}{2g}, \quad (14)$$

де H_e – загальна енергія 1 кг ваги бомби або так звана «енергетична висота», що складається з потенційної (H) і кінетичної ($V^2/2g$) енергій.

Приріст енергетичної висоти за рахунок тяги двигуна можна оцінити у виді:

$$\Delta H_e = \frac{dH_e}{dt} \Delta t. \quad (15)$$

Похідну dH_e/dt визначимо диференціюванням рівняння (14):

$$\frac{dH_e}{dt} = \frac{dH}{dt} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dt}. \quad (16)$$

Вона складається з суми похідних геометричної висоти (вертикальної швидкості) і з тангенціального прискорення.

Похідну dH/dt визначимо через параметри ПКАБ. Для цього напишемо два відомих рівняння динаміки польоту для висоти і швидкості:

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \theta_{\partial\theta}, \quad \frac{dV}{dt} = g(n_x - \sin \theta_{\partial\theta}). \quad (17)$$

Визначимо з другого рівняння $\sin \theta_{\partial\theta}$

$$\sin \theta_{\partial\theta} = gn_x - \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

та підставимо його у перше рівняння. Отримаємо:

$$\frac{dH}{dt} = V(n_x - \frac{1}{g} \frac{dV}{dt}). \quad (19)$$

Підставимо похідну dH/dt в (14) та одержимо:

$$\frac{dH_e}{dt} = Vn_x = V \frac{P - X_a}{G_{\partial\theta}}. \quad (20)$$

За знаком похідної dH_e/dt можна визначити зміну функції (у даному разі функції $H_e(t)$): якщо похідна додатна (а це можливо при $P > X_a$), то функція зростаюча – енергія ПКАБ збільшується за часом незалежно від маневру, що виконує бомба. І навпаки – якщо тяга менша за лобовий опір, загальна енергія зменшується за часом.

У нашому випадку звичайно $P < X_a$, тому тяга двигуна тільки зменшує похідну dH_e/dt , але не змінює її знак. Іншими словами, і з тягою двигуна енергія ПКАБ продовжує зменшуватися, але не так швидко, як без двигуна.

Дальність польоту при наявності двигуна визначається рівнянням:

$$\frac{dL}{dt} = V \cos \theta_{\partial\theta}. \quad (21)$$

Поділивши це рівняння на рівняння (20), одержимо:

$$\frac{dL}{dH_e} = \frac{\cos \theta_{\partial\theta}}{n_x}. \quad (22)$$

Шляхом інтегрування (22) отримаємо:

$$L_{\partial\theta} = \int_{H_{e1}}^{H_{e2}} \frac{\cos \theta_{\partial\theta}}{n_x} dH_e. \quad (23)$$

У формулі (23) $H_{e1} = H_1 + \frac{V_1^2}{2g}$, $H_{e2} = H_2 + \frac{V_2^2}{2g}$, де

індекс «1» – відповідає польоту ПКАБ у момент включення двигуна, індекс «2» – моменту закінчення його роботи. Вважаємо, що включення двигуна змінює тільки кут нахилу траєкторії і величину тангенціального перевантаження від θ і n_x до значень $\theta_{\partial\theta}$ і $n_{x\partial\theta}$. Їх постійність дозволяє записати рішення інтегралу (23) у наступному виді:

$$L_{\partial\theta} = \frac{\cos \theta_{\partial\theta}}{n_{x\partial\theta}} (H_{e2} - H_{e1}). \quad (24)$$

Таким чином, частина траєкторії польоту ПКАБ з працюючим двигуном обумовлена двома параметрами: $\theta_{\partial\theta}$ і $n_{x\partial\theta}$ та приростом енергії. Із формули (20) видно, що приріст енергії ПКАБ тільки за рахунок тяги двигуна буде залежати від величини тяги P , часу роботи двигуна Δt , а також від швидкості польоту:

$$\Delta H_{e\partial\theta} = \frac{VP}{G} \Delta t. \quad (25)$$

Раніше було показано, що зниження ПКАБ доцільно виконувати на постійній *приладовій* швидкості, яка забезпечує максимальну аеродинамічну якість [3]. Між тим, приріст енергії в формулі (25) визначається *істинною* (точніше шляховою при наявності вітру) швидкістю. Ці швидкості пов'язані між собою умовою $V \approx V_{np} \sqrt{\Delta}$, тобто при плануванні бомби з постійною приладовою швидкістю істинна швидкість і приріст енергії будуть зменшуватися по мірі зменшення висоти.

Так, на висоті $H = 12\,000$ м маємо $\sqrt{\Delta} = 0,5$, на висоті $H = 8\,000$ м $\sqrt{\Delta} = 0,65$, на висоті $H = 5\,000$ м він дорівнює $\sqrt{\Delta} = 0,77$, біля землі $\sqrt{\Delta} = 1$. Звідси слідує висновок: включення двигуна доцільно виконувати на початку траєкторії планування, коли істинна швидкість найбільша, а двигун забезпечує найбільший приріст дальності.

Рух ПКАБ після скидання буде залежити від закону управління бомби. Найбільш раціональним, на нашу думку, є закон управління приладовою швидкістю. *Витримування приладової швидкості найвигіднішою забезпечить зниження бомби з максимальною аеродинамічною якістю і, отже, найбільшу дальність.*

Тому перед скиданням ПКАБ рулі повинні бути встановлені в положення, що відповідає їх балансувальній величині на найвигіднішій швидкості і висоті, а також з включеним двигуном. Тоді бомба після відділення від літака у перехідному процесі буде намагатися перейти на найвигіднішу швидкість і збалансуватися по моментах та силах.

Так, для отримання найбільшої дальності польоту скидання бажано виконувати якомога на більшій швидкості і висоті, щоб бомба набрала найбільшу енергію (формула 25), яку можливо перетворити в дальність. У цьому випадку система керування буде намагатися зменшити швидкість шляхом зменшення кута зниження бомби або переводу її в режим набору висоти [8]. На даному етапі включається двигун.

Після досягнення найвигіднішої швидкості система керування переведе ПКАБ в режим сталого зниження (точка В на рис. 3). Після витрати палива двигун зу-

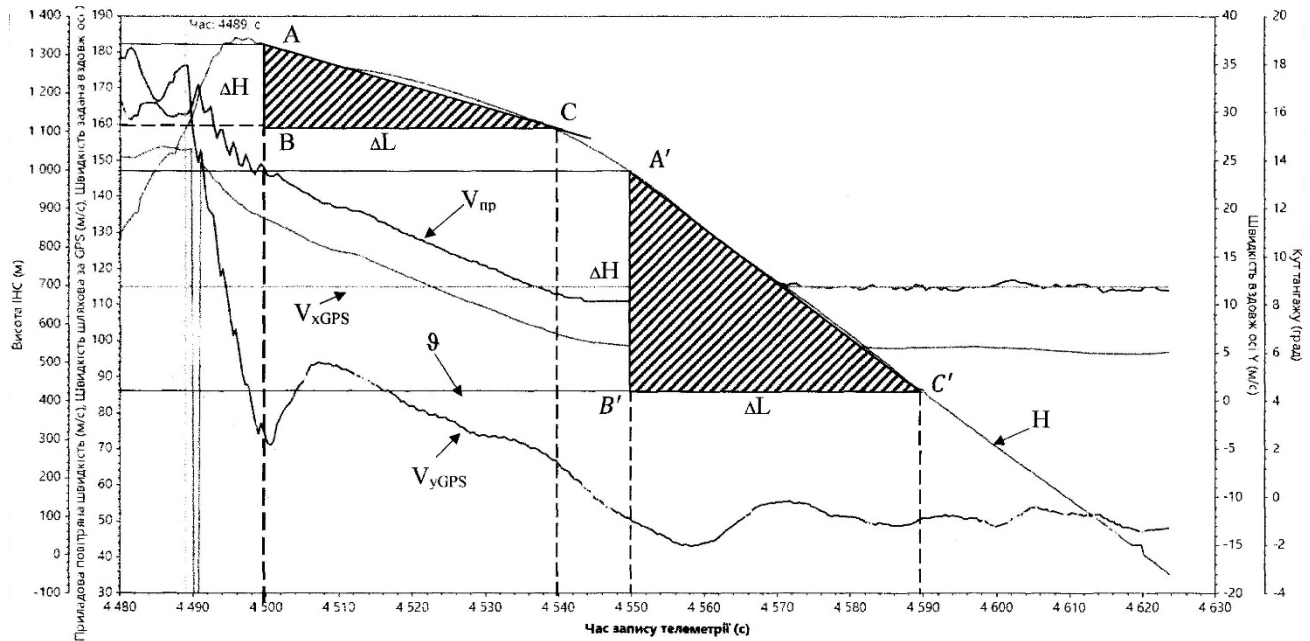


Рис. 4. Запис зміни параметрів польоту при плануванні ПКАБ у льотному експерименті

пинається, ПКАБ переходить на більший кут зниження (точка С).

Таким чином, загальна дальність польоту ПКАБ буде рівною:

$$L = L_1 + L_{об} + L_2, \quad (26)$$

де L_1 – ділянка польоту від початку скидання до досягнення найвигіднішої швидкості, $L_{об}$ – ділянка польоту з працюючим двигуном, L_2 – ділянка польоту після виключення двигуна.

Визначення полярів та аеродинамічної якості у льотному експерименті

При льотних випробуваннях ПКАБ її оснащують контрольно-записувальною апаратурою, яка дозволяє отримати записи параметрів польоту за часом. Приклад таких записів наведений на рис. 4.

Авіаційна бомба скидається з кабрирування на висоті $H = 850$ м, на швидкості, суттєво більшій найвигіднішій, тому вона системою керування одразу переводиться у набір висоти (до 1350 м). Ця ділянка польоту характеризується збуреною зміною всіх параметрів: швидкостей – приладової $V_{пр}$, горизонтальної V_{xGPS} , та вертикальної V_{yGPS} , кута тангажу φ . Далі траєкторія повертається і починається етап зниження. Його можна розділити на два етапи: 1) $t = 4500$ – 4545 с, 2) $t = 4545$ – 4620 с.

Перший етап виконується з працюючим двигуном, другий – з виключеним. Етапи легко різняться кутами нахилу запису висоти за часом: у першого він суттєво менше, ніж у другого. Основною вимогою до них є стале прямолінійне зниження, що реалізується при витриманні близькими до постійних значень приладової, горизонтальної V_{xGPS} і вертикальної V_{yGPS} швидкостей. На першому етапі цим вимогам не відповідають лише швидкості, тому замінимо їх змінні значення на середні, щоб одержати хоча б наближений результат.

За часом параметри першого етапу є близькими до постійних і розташовані в інтервалі часу $\Delta t = 4500$ – 4540 с, а параметри другого етапу в інтервалі $\Delta t = 4550$ –

4590 с. В даних інтервалах будемо трикутники ABC і $A'B'C'$ так, щоб їх гіпотенузи лягли на висоту. Тоді їх катети AB та $A'B'$ визначатимуть втрачену при зниженні висоту ΔH .

Катети CB і $C'B'$ визначають дальність польоту на кожному етапі $\Delta L = V_{xGPS}\Delta t$. Одержані значення ΔH і ΔL дозволять обчислити за наведеними раніше формулами інші характеристики планеруючої бомби.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена методика дозволяє визначити поляр, аеродинамічну якість планеруючої бомби за записаними у польоті параметрами та розрахувати дальність її польоту. Визначені умови забезпечення максимальної дальності польоту ПАБ.
2. Обґрунтовані льотно-технічні показники бомби, що обладнана крилом та турбореактивним двигуном. Визначені умови оптимального використання палива двигуном та приріст дальності польоту бомби при їх практичному застосуванні.
3. За допомогою енергетичного методу динаміки польоту встановлено, що включення двигуна доцільно виконувати на якомога більших швидкостях після скидання бомби.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Зірка А.Л., Козлов В.Г. Оцінка бойових можливостей літаків тактичної авіації російської федерації у війні з Україною. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2022. № 1(33). С. 109–119. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).109-119](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).109-119).
2. Удосконалення бомбометання з кабрирування як засіб підвищення ефективності бойового застосування ударного літального апарату / Кушнір С.В., Сілков В.І., Зірка А.Л., Кравчук І.С. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2021. № 3(31). С. 44–50. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3\(31\).44-50](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3(31).44-50).
3. Сілков В.І., Архипов М.І., Зірка А.Л. Оптимізація режимів бойового застосування та конструктивних пара-

- метрів авіаційних коригованих засобів ураження класу повітря – поверхня. озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2022. № 2(34). С. 88—99. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2\(34\).88-99](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2(34).88-99).
4. Зірка А.Л. Методика оцінки значень основних параметрів бомбометання з кабрирування для забезпечення реалізації заданої дальності польоту бомби на основі енергетичного підходу. озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2023. № 1 (37). С. 40—45. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1\(37\).40-45](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1(37).40-45).
 5. Аеродинаміка літальних апаратів: підруч. / Котельніков Г.Н., Мамлюк О.В., Сілков В.І., Терещенко Ю.М.
 6. Сілков В.І. Динаміка польота летальних апаратів. Київ: КМУ ГА. 1997. 424 с.
 7. Теорія теплових двигунів: підруч. / [Терещенко Ю.М., Бойко Л.Г., Дмитрієв С.О. та ін.]; за ред. Ю. М. Терещенка. Київ: Вища шк. 2001. 382 с.
 8. Вороб'єв В.Г., Кузнецов С.В., Автоматическое управление полетом самолетов. М.: Транспорт. 1995. 359 с.

REFERENCES

1. Zirka, A.L. & Kozlov, V.G. (2022). “Otsinka boiovykh mozhlyvostei litativ taktychnoi aviatsii rosiiskoi federatsii u viini z Ukrainoiu” [Estimation of russian tactical aviation airplanes capabilities in russia-Ukraine war. Armament and military equipment]. K.: CSRI AME AF of Ukraine. № 1(33). P. 109—119. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).109-119](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).109-119).
2. Kushnir, S.V., Silkov, V.I., Zirka, A.L. & Kravchuk, I.S. “Udoskonalennia bombometannia z kabryuvannia yak zasib pidvychennia efektyvnosti boiovogo zastosuvannia udarnogo litalnogo aparatu” [Climb bomb drop method improvement as the way to increase of attack airplane effectiveness]. K.: CSRI AME AF of Ukraine. 2012. # 3(31). P. 44—50. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3\(31\).44-50](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3(31).44-50).
3. Silkov, V.I., Arkhypov, M.I. & Zirka, A.L. (2022). “Optyimizatsiia rezhymiv boiovogo zastosuvannia ta konstruktivnykh parametriv aviatsiinykh korygovanykh zasobiv urazhennia klasu povitria – poverkhnia” [Optimization of combat application modes and design parameters of air-to-surface guided aviation armament]. CSRI AME AF of Ukraine. # 2 (34). P. 88—99. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2\(34\).88-99](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2(34).88-99).
4. Zirka, A.L. (2023). “Metodyka otsinky znachen osnovnykh parametriv bombometannia z kabryuvannia dlia zabezpechennia realizatsii zadanoi dalnosti polotu bomby na osnovi energetychnogo pidkhotu” [Value estimation method for the main parameters of climb bombing with the purpose to reach the required bomb flight distance, based on energy method]. CSRI AME AF of Ukraine. # 1(37). P. 40-45. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1\(37\).40-45](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.1(37).40-45).
5. Kotelnikov, G.N., Mamlyuk, O.V., Silkov, V.I. & Tereshchenko, Y.M. “Aerodynamika litalnykh aparativ: pidruchn.” [Aircraft aerodynamics: handbook].
6. Silkov, V.I. (1997). “Dinamika poleta letatelnykh apparatov” [Aircraft flight dynamics]. K.: KIUC A. 424 p.
7. Tereshchenko, Y.M., Boiko, L.G., Dmitriev, S.O. and others. (2001). “Teoriia teplovykh dvyguniv: pidruchn.”

[Heat engine theory: handbook]; under Y.M. Tereshchenko red. K.: High school. 382 p.

8. Vorobiov, V.G. & Kuznetsov, S.V. “Avtomaticheskoe upravlenie poletom samoletov” [Airplane flight automatic guidance]. M.: Transport. 1995. 359 p.

**Silkov V.I., Zirka A.L., Torkhov K.M.,
Burtyn M.V.**

METHOD FOR AERODYNAMIC AND FLIGHT-TACTICAL PARAMETER DEFINITION OF GUIDED AVIATION BOMB IN FLIGHT EXPERIMENT

The article contains the method for calculating of winged and motorized bomb flight distance. Working formulas are proposed for estimating different configuration variants: full configuration, jet engine only and wing only. The flight dynamic energy method allows obtaining an increase in gliding distance in depending on engine thrust and engine operation time. It is shown that integration of engine and wing significantly exceeds the parameters achieved using aerodynamic quality alone. It is shown that engine application allows to decrease bomb gliding trajectory angle by a value, proportional to thrust/bomb-weight ratio.

Using the energy method, it was proven that to reach the minimum fuel consumption the engine should be started the initial part of flight trajectory for the same thrust pulse. To achieve the maximum glide distance, the bomb drop should be released at the most appropriate aircraft velocity.

Keywords: aviation bomb, gliding aviation bomb, guided aviation bomb, flight trajectory, aerodynamic quality, flight distance, jet engine.

Відомості про авторів:

Сілков Валерій Іванович

кандидат технічних наук, доцент
науковий співробітник
науково-дослідного відділу розвитку
авіаційно-космічних систем (комплексів)
Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4446-212X>
e-mail: silkov041232@gmail.com

Зірка Андрій Леонідович

кандидат технічних наук, старший дослідник
начальник відділу розвитку
авіаційно-космічних систем (комплексів)
Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5304-2894>
e-mail: alzirka@ukr.net

Торхов Кирил Михайлович

Генеральний директор НПФ «Адрон DAM»
м. Київ, Україна

Буртин Михайло Васильович
інженер-конструктор ДП «Антонов»
м. Київ, Україна

Information about the authors:

Silkov Valerii
Candidate of Technical Sciences
Leading Researcher of Research Department
of Aviation-Space Systems (Complexes)
Central Scientific Research Institute of Armament
and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orsid.org/0000-0003-4446-212X>
e-mail: silkov041232@gmail.com

Zirka Andrii
Candidate of Technical Sciences
Chief of Research Department of Aviation-Space
Systems (Complexes)
Central Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5304-2894>
e-mail: alzirka@ukr.net

Torkhov Kyryl
General director, SPC «AdronDAM»

Burtyn Mikhail
Designer engineer, SE «Antonov»

Стаття надійшла до редколегії 23.12.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 621.396.9

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).40-47](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).40-47)

А. В. КУПЧИН, доктор філософії
<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>

Ю. В. СОЛОШЕНКО, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0009-0002-9268-2813>

В. В. ДЖАНАЗЯН
<https://orcid.org/0009-0006-5327-6678>

К. І. ЖУРБА
<https://orcid.org/0009-0008-7237-266X>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ «ГЕРАНЬ-2» ТА «ГЕРАНЬ-3»

У статті проведено порівняльний аналіз конструктивно-технічних особливостей безпілотних літальних апаратів «Герань-2» та «Герань-3», виявлено відмінності у застосованих конструктивно-технічних рішеннях і визначено основні тенденції їх модернізації.

Особливу увагу приділено моделі «Герань-3», яка є більш сучасною модифікацією та відрізняється удосконаленими характеристиками систем керування та живлення.

Ключові слова: Герань-2, Герань-3, безпілотний літальний апарат, порівняльний аналіз, конструктивно-технічні особливості, система керування, турбореактивний двигун, система навігації, планер, бойове застосування.

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати за останні роки стали важливою складовою в тактиці та стратегії ведення сучасних бойових дій. В розрізі російсько-української війни одними із найбільш відомих і широко використовуваних є різні модифікації ударного безпілотного літального апарата (далі – БпЛА) «Shahed», які застосовуються російськими військами, починаючи з 2022 року [1].

Першочергово ворог використовував БпЛА Іранського походження «Shahed-131», який в рф отримав назву «Герань-1». Згодом, став застосовуватися більш потужний БпЛА «Shahed-136», виробляти аналоги якого рф почала на своїй території під назвою «Герань-2» [2, 3].

У 2024 році зафіксовані поодинокі застосування реактивних ударних БпЛА, імовірно іранського походжен-

ня та ідентифікованого як «Shahed-238». У 2025 році зафіксовано застосування реактивних ударних БпЛА, ідентифікованих як БпЛА «Shahed-238» [4, 5] та БпЛА російського походження «Герань-3» [6].

Протягом трирічного періоду активного застосування ударні БпЛА сімейства «Shahed» зазнали суттєвої еволюційної трансформації. У цьому дослідженні наведено порівняльний аналіз конструктивно-технічних характеристик БпЛА «Герань-2» та «Герань-3» за їхніми ключовими функціональними підсистемами, а саме: планером, бойовою частиною, бортовими системами керування та навігації, паливною системою, системою енергозабезпечення, GSM-модулем, силовою установкою, а також засобами відеофіксації та телеметрії.

Об'єктом дослідження є БпЛА ударного типу серії «Герань», що використовуються у сучасних бойових діях.

Предметом дослідження є конструктивно-технічні особливості БпЛА «Герань-2» серії «БІ» (далі – «Герань-2») та БпЛА «Герань-3» серії «У» (далі – «Герань-3») та їх функціональні системи.

Метою статті є проведення порівняльного аналізу конструктивно-технічних особливостей БпЛА «Герань-2» та БпЛА «Герань-3», виявлення основних відмінностей у їхній структурі й системах та визначення тенденцій модернізації.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Конструкція БпЛА «Герань-3» та БпЛА «Герань-2» передбачає компактні розміри та незначну масу, як для БпЛА стратегічного рівня, що дозволяє йому бути універсальною ударною авіаційною платформою для нанесення точкових або групових ударів по об'єктам інфраструктури в оперативній та стратегічній глибині.

Планер. Планер БпЛА виконує ключову роль у забезпеченні аеродинамічних характеристик, масо-габаритного балансу та загальної ефективності польоту.

Планери БпЛА «Герань-3» та «Герань-2» виготовлені за аеродинамічною схемою типу дельта-крило, мають ліву та праву консолі крила, на яких кріпляться стабілізатори (вінглети) [7]. Для порівняння на рис. 1 наведено фотографії двох планерів: БпЛА «Герань-2» серії «БІ» №18125 та БпЛА «Герань-3» серії «У» №285. Обидва зразки виготовлені на одному заводі.

Конструктивно планер БпЛА «Герань-3» – це модернізований планер БпЛА «Герань-2», до конструкції якого було додано повітрозабірник (рис. 2) для турбореактивного двигуна (далі – ТРД).

На повітрозабірнику БпЛА «Герань-3» є напис «35191» (рис. 2), що дає підстави припускати, що це планер БпЛА «Герань-2» серії «БІ» №35191, який було передано на завод для переобладнання, та якому присвоєно серію «У» №285. У нижній центральній частині планера дещо збільшено отвір для монтажу повітрозабірника та встановлено елементи кріплення ТРД.

БпЛА «Герань-3» відрізняється від БпЛА «Герань-2» також кріпленням силової установки до планера. Отвір у корпусі для встановлення бойової частини (далі – БЧ) був збільшений з 195×510 мм до 300×555 мм, що значно спростило процес монтажу й обслуговування бойової

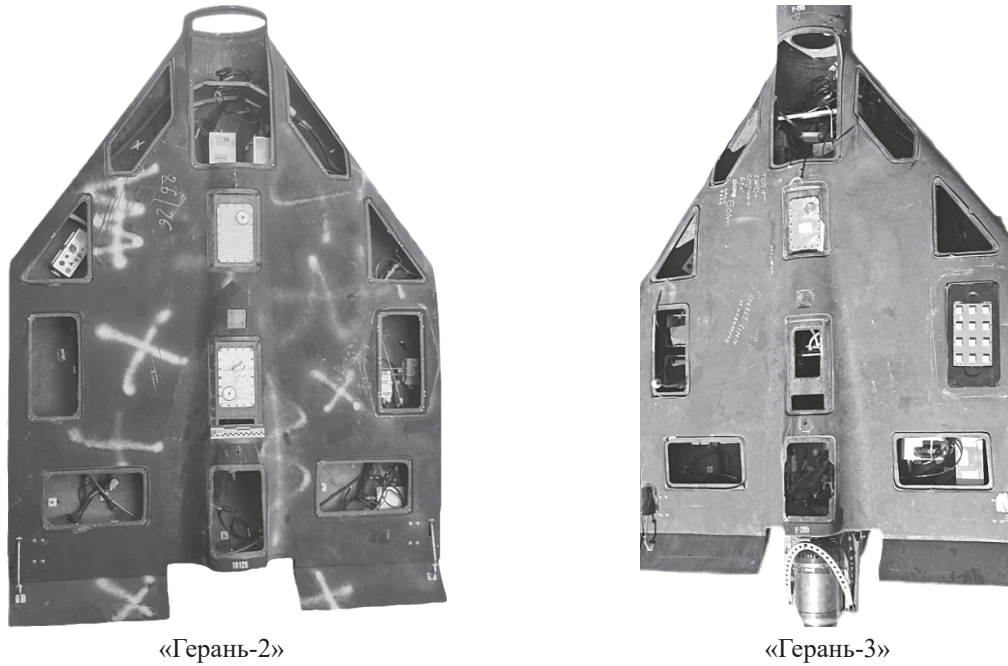


Рис. 1. Планери БпЛА

частини, а також дало змогу інтегрувати боєприпаси різних типів і конфігурацій.

З огляду на сучасні технології, виробництво планеру спрямоване на використання легких, міцних і технологічно передових матеріалів [8, 9]. Основний акцент робиться на створенні корпусу, що витримує різні механічні навантаження, водночас залишається достатньо легким для досягнення бажаних характеристик маневреності та дальності польоту. Розглянуті зразки планерів БпЛА «Герань-2» та БпЛА «Герань-3» мають спільні технологічні ознаки та виготовлені за єдиними технічними стандартами на одному заводі в Алабузі. Серійні номери планерів відповідають серіям «Ы», «У», «Ъ» та «Э», що відображає номенклатуру виробництва цієї лінійки БпЛА.

Модернізація планера з «Герань-2» до «Герань-3» спрямована на:

- підвищення швидкісних характеристик за рахунок переходу на турбореактивну силову установку;
- удосконалення технології складання та обслуговування;
- збереження загальної конструкційної схеми.

Планер БпЛА «Герань-3» є модернізованою версією «Герань-2», що зберігає базову аеродинамічну схему, але адаптована під турбореактивну силову установку. Конструкція демонструє високу ступінь уніфікації та

застосування сучасних композитних матеріалів, характерних для серійного виробництва на підприємстві в Алабузі.

Двигун. БпЛА «Герань-3» оснащений турбореактивним двигуном виробника «Telefly», тоді як у конструкції БпЛА «Герань-2» застосовано двигун внутрішнього згоряння (далі – ДВЗ) типу «MD550». Зміна типу силової установки є ключовою відмінністю між зазначеними моделями та зумовлює їх різні аеродинамічні, енергетичні та експлуатаційні характеристики.

ТРД виробника «Telefly» характеризуються простою та компактною конструкцією, легкістю розбирання та складання і достатньою міцністю деталей. ТРД мають більший тепловий слід порівняно з поршневіми або електричними двигунами, що полегшує їх виявлення інфрачервоними та тепловізійними засобами спостереження, особливо в нічний час або за умов обмеженої видимості.

Застосування ТРД виробника «Telefly» у БпЛА «Герань-3» дає перевагу у швидкості та термінах прориву, але не компенсує обмежень по дальності та корисному навантаженню порівняно з ДВЗ «MD550» БпЛА «Герань-2».

Паливна система. Особливістю паливної системи БпЛА «Герань-3» є наявність у складі паливного насоса великого тиску. За допомогою насоса великого тиску

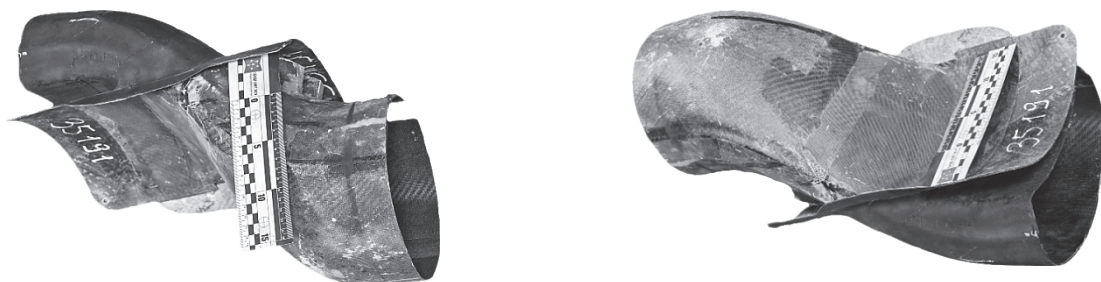


Рис. 2. Повітрязабірник БпЛА «Герань-3»

блок керування двигуном регулює подачу палива до двигуна. В паливній системі автоматична подача палива одним ключем. Система запалювання стабільна та надійна.

Максимальна швидкість БпЛА «Герань-3» 450 км/год, тоді як у БпЛА «Герань-2» 220 км/год. Орієнтовна операційна дальність застосування БпЛА «Герань-3» складає до 1000 км [10].

Система керування. Система керування БпЛА «Герань-3» забезпечує стабільність польоту та ефективність виконання бойових завдань. Вона складається з пульта авіоніки, блока керування (FCU), блока керування двигуном, модуля конвертації системи керування та сервоприводів.

Блок керування є аналогічним до блока, що використовується у БпЛА «Герань-2», як за архітектурою, так і за функціональним призначенням. У БпЛА «Герань-3», у порівнянні з БпЛА «Герань-2», змінено не лише тип двигуна, але й логіку його керування.

Система включає в себе блок керування двигуном та окремий модуль конвертації, необхідний для інтеграції з блоком керування (FCU). Це свідчить про модифікацію базового програмно-апаратного комплексу, без створення нової системи керування з «нуля».

Керування поверхнями польоту (елевонами) працює за класичною для схем типу дельта-крило логікою: елевони, розташовані в хвостовій частині планера, одночасно виконують функції елеронів і рулів висоти. Кут їх відхилення змінюється за допомогою електричних сервоприводів, що керуються сигналами від блока керування (FCU). Алгоритми стабілізації та керування аналогічні тим, що реалізовані у БпЛА «Герань-2».

Система керування БпЛА «Герань-3» є модернізованою версією системи, використаної у БпЛА «Герань-2». Основні функціональні блоки збережені, але адаптовані до нової силової установки. Архітектура передбачає автономне виконання польотного завдання, стабілізацію польоту, контроль параметрів двигуна та керування аеродинамічними поверхнями. Розподіл функцій між блоком керування (FCU), блоком керування двигуном, модулем конвертації та сервоприводами забезпечує надійну роботу всієї системи в автономному режимі.

Система живлення. Система живлення БпЛА забезпечує роботу всіх бортових електронних компонентів, сенсорів, систем зв'язку та відеофіксації, а також автопілота та інших допоміжних пристроїв. У БпЛА «Герань-2» основне навантаження припадало на один акумулятор, що живив систему запалювання ДВЗ та систему керування. Натомість у БпЛА «Герань-3» застосовано розподілену архітектуру енергозабезпечення, що базується на використанні чотирьох акумуляторних батарей, розділених на два незалежні контури. Один контур призначений виключно для забезпечення роботи ТРД. Другий контур забезпечує автономне живлення всіх інших бортових систем БпЛА.

Виходячи з наведеного, система живлення «Герань-3» побудована за роздільною схемою – один контур забезпечує живлення систем керування, інший – двигуна. Це зменшує ризик втрати керуваності у разі

перевантаження енергосистеми під час запуску та роботи ТРД.

Система навігації. Розташування та архітектура вузлів загалом у БпЛА «Герань-3» та БпЛА «Герань-2» подібні, що свідчить про використання тієї ж платформи керування і навігації, адаптованої під нову силову установку [11]. У результаті дослідження системи навігації БпЛА «Герань-3» особливостей не виявлено.

Бойова частина (далі – БЧ). БЧ є ключовим елементом ударних БпЛА, що визначає їх ефективність у нанесенні ураження. В різних модифікаціях БпЛА типу «Shahed», які застосовуються рф, починаючи з 2022 року, виявлено вісім моделей БЧ [12, 13]. При цьому, конструкція планеру не змінюється в залежності від БЧ. У випадку використання БЧ різної ваги (від 50 до 100 кг) бортове радіоелектронне обладнання розподіляється в планері, що разом з різними варіантами кріплення для БЧ 50 кг, 90 кг або 100 кг дозволяє зберегти центр мас.

Результати дослідження свідчать, що бойова частина БпЛА «Герань-3» не має суттєвих конструктивних відмінностей від бойової частини БпЛА «Герань-2».

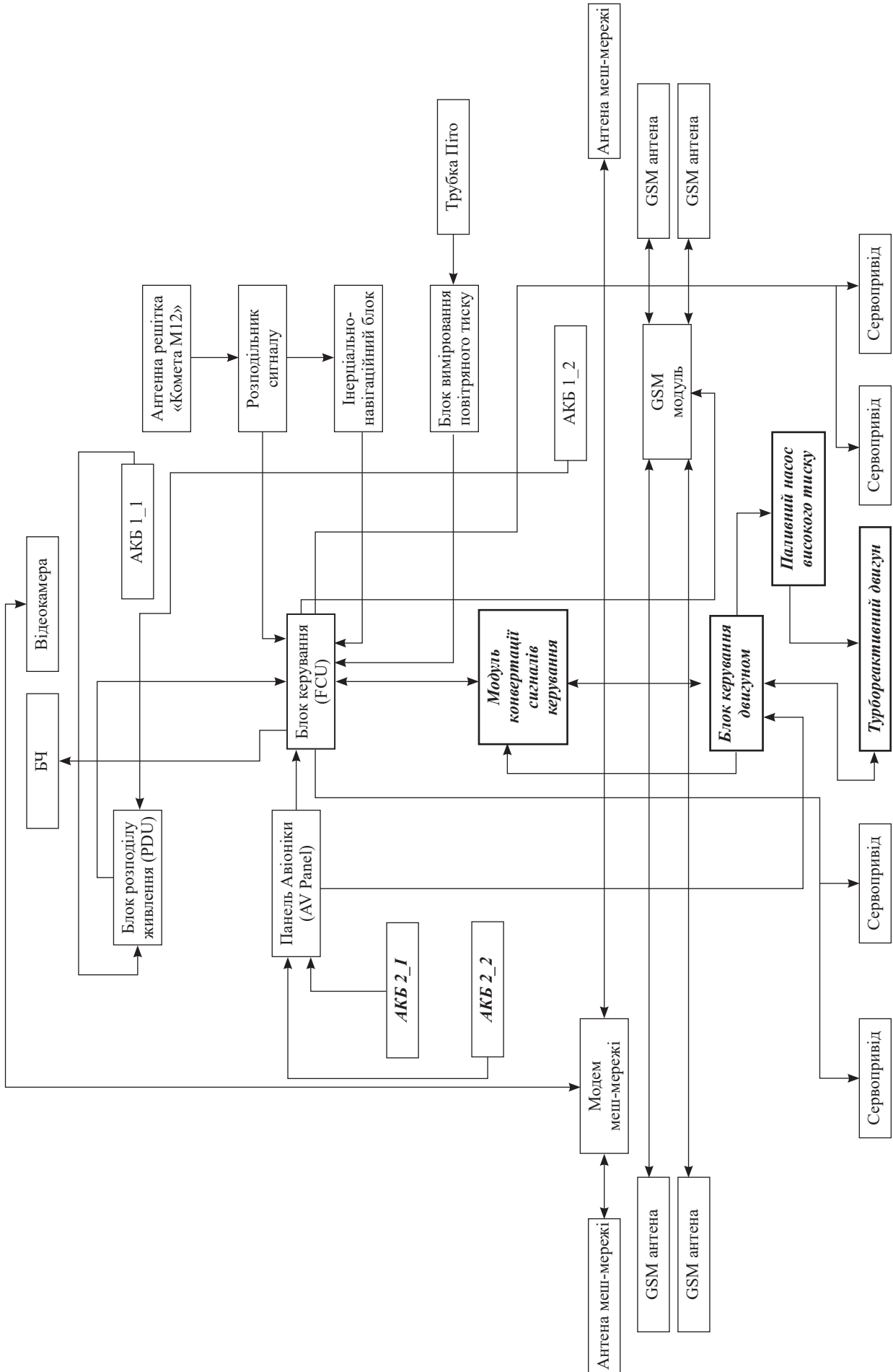
Система відеофіксації та передачі зображення. У досліджуваному БпЛА «Герань-3» наявний меш-модем MIMO MESH XK-F359 виробництва компанії Xingkaitech (Китай), який забезпечує радіозв'язок між відеокамерою та оператором безпосередньо (дальність до 70 км) або через інші меш-модеми.

У разі наявності в мережі доступного меш-модему з підключенням до Інтернету (наприклад, меш-модем у наземному пункті з виходом у Інтернет або встановлений на БпЛА зі станцією зв'язку через LTE чи Starlink) максимальна дальність передачі даних фактично не обмежена.

В наявному зразку меш-модему передача даних здійснювалася у діапазоні частот від 1,3 до 1,5 ГГц. Для цього використовувалися дві антени, встановлені на стабілізаторах БпЛА. Меш-модем отримує живлення від акумуляторної батареї, забезпечує передачу до оператора даних з відеокамери. Меш-модем має мережеве з'єднання з польотним контролером, що теоретично може використовуватись як для отримання телеметрії, так і для зміни польотного завдання. В досліджуваному БпЛА «Герань-2» система відеофіксації та передачі зображення була відсутня.

Необхідно зауважити, досліджуваний БпЛА «Герань-3» мав наступні складові частини: планер, бойова частина, система керування, паливна система, система живлення, система навігації, GSM модуль [14], ТРД, система відеофіксації та передачі зображення. За результатами досліджень на рис. 3 представлена функціональна схема БпЛА, де виділені вузли, які відсутні в типовій комплектації БпЛА «Герань-2».

Зважаючи на викладене, «Герань-3» є логічним технологічним кроком еволюції платформи «Герань-2»: модернізація спрямована на досягнення вищих швидкісних характеристик, але супроводжується новими експлуатаційними обмеженнями, що мають бути враховані в подальших оцінках ризику та вживаємих контрзаходах.



Р и с . 3. Функціональна схема БПЛА «Герань-3»

ВИСНОВКИ

За підсумками досліджень конструктивно-технічних особливостей БПЛА «Герань-2» та БПЛА «Герань-3» визначені наступні ключові результати.

1. Аналіз функціональної схеми БПЛА «Герань-3» показав: у порівнянні з комплектацією БПЛА «Герань-2» у його складі з'явилися нові елементи. Ці зміни свідчать про розширення функціональних можливостей.

2. Ключова відмінність БПЛА «Герань-3» від попередніх модифікацій БПЛА «Герань-2» – це ТРД, використання якого значно підвищує швидкість руху даного БПЛА, що ускладнює перехоплення системою ППО та БПЛА-перехоплювачами.

Поява БПЛА «Герань-3» свідчить про зміну тактики противника. Якщо БПЛА «Герань-2» використовувалися для масованих атак, які виснажували системи ППО, то БПЛА «Герань-3», ймовірно, буде застосовуватися для точкових ударів по особливо важливих об'єктах. Його висока швидкість дозволяє уражати цілі, які раніше були недосяжні для повільних попередніх модифікацій ударного БПЛА «Герань-2».

3. У БПЛА «Герань-3» змінено не лише тип двигуна, але й логіку його керування. Система включає окремий модуль конвертації для інтеграції з блоком керування (FCU).

4. Планер БПЛА «Герань-3» є модернізованою версією планеру БПЛА «Герань-2», що зберігає базову аеродинамічну схему, але адаптована під турбореактивну силову установку. Конструкція демонструє високу ступінь уніфікації та застосування сучасних композитних матеріалів, характерних для серійного виробництва на підприємстві в Алабузі.

5. Система керування БПЛА «Герань-3» є модернізованою версією системи, використаної у «Герань-2». Основні функціональні блоки збережені, але адаптовані до ТРД. Архітектура передбачає автономне виконання польотного завдання, стабілізацію польоту, контроль параметрів двигуна та керування аеродинамічними поверхнями. Розподіл функцій між блоками системи керування забезпечує надійну роботу всієї системи в автономному режимі.

6. Система живлення БПЛА «Герань-3» є модернізованою порівняно з «Герань-2». Нова архітектура забезпечує розділення контурів живлення бортових систем і ТРД, підвищуючи надійність роботи та енергетичну стійкість апарата.

Враховуючи вищезазначене, можна стверджувати, що «Герань-3» є новою гілкою в сімействі ударних БПЛА типу «Герань». Цей БПЛА дозволяє розширити варіативність тактик повітряного нападу ворога. Перехід від модифікації «Герань-2» до «Герань-3» знаменує собою еволюцію засобів повітряного нападу противника – від стратегії «виснаження» засобів протиповітряної оборони до стратегії високошвидкісних точкових ударів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Купчин А.В. Досвід застосування в ході російсько-української війни та перспективи розвитку безпілотних (безекіпажних) апаратів та роботизованих систем. Зб. матер. міжвідомч. наук.-практ. круглого столу. Київ:

Центр. наук.-досл. інст. Збройних Сил України. 2024. С. 55.

- Russia upgrades Iran-origin Shahed drones for stealthier, deadlier attacks on Ukraine. Defense Mirror. 2025. July. Available at: <https://www.defensemirror.com/news/39930> (accessed 25.07.2025).
- Головний портал про спонсорів та співучасників агресії. Герань-2. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://war-sanctions.gur.gov.ua/ru/uav/379>. (дата звернення 15.10.2025).
- Drone wreckage confirms that russian forces employ Iranian Shahed-238 jet-powered drones against Ukraine. 2025. Army Recognition. July. Available at: <https://armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/conflicts-in-the-world/russia-ukraine-war-2022/drone-wreckage-confirms-that-russian-forces-employ-iranian-shahed-238-jet-powered-drones-against-ukraine> (accessed: 09.07.2025).
- Russia's jet-powered Shahed-238 drones introduce new challenges to Ukraine's air defenses. Army Recognition. 2025. July. Available at: <https://armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/conflicts-in-the-world/russia-ukraine-war-2022/russias-jet-powered-shahed-238-drones-introduce-new-challenges-to-ukraines-air-defenses> (accessed: 02.07.2025).
- Russia begins production of jet-powered «Geran-3» drone – a faster, deadlier Shahed-238 clone. United24 Media. Febr., 2025. Available at: <https://united24media.com/latest-news/russia-begins-production-of-jet-powered-geran-3-drone-a-faster-deadlier-shahed-238-clone-6001> (accessed: 18.02.2025).
- Kupchyn, A. V., Dovhopoly, A. S., Soloshenko, Yu. V., Zhivotovsky, R. M., Dzanazian, V. V., Zhurba, K. I., Yakovlev, M. Yu., Hurnovych, A. V., Kondrachukov, S. I., Petruk, S. M. Results of research on the determination of the necessary kinetic energy to impact the Shahed-136 UAV. Озброєння та військова техніка. 2022–2024. Спецвипуск. С. 243–253.
- Визначення хімічного складу, структури та топографії композиційних матеріалів корпусу планеру баражуючого боєприпасу «Shahed-136» методом скануючої електронної мікроскопії / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одноралов І.В., Кучинський А.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. Озброєння та військова техніка. Київ: Центральний науково дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2023. № 4(40). С. 53–61. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.4\(40\).53-61](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.4(40).53-61).
- Особливості хімічного складу, структури та топографії композиційних матеріалів корпусу планеру модернізованого баражуючого боєприпасу «Shahed-136» (чорного) / Богданов В.Л., Григоренко О.Я., Чепков І.Б., Одноралов І.В., Кучинський А.В., Кременицький В.В., Сперкач С.О. Озброєння та військова техніка. 2024. № 1(41). С. 75–82. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1\(41\).75-82](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1(41).75-82).
- Реактивний «Шахед» на китайському двигуні: наскільки «Герань-3» дорожча за гвинтові «Герань-2». Defens Express. 2025. Вересень. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://defence-ua.com/news/reaktivnij_shahed_

- na_kitajskomu_dviguni_na_skilki_geran_3_dorozhcha_za_gvintovi_geran_2-20228.html (дата звернення 25.10.2025).
11. Козлов В.Г., Шелемін З.К., Твердохлібов В.В. Оцінка можливостей бортових навігаційних систем безпілотних літальних апаратів «Shahed-131», «Shahed-136». Зб. наук. пр. Київ: Центральний наук.-досл. інст. озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2024. № 1(91). С. 217—229.
 12. Аналіз застосування енергетичних добавок на основі мікро- та нанопорошків металів і неметалів в зарядах вибухових речовин / Бойко В.В., Войтенко Ю.І., Гімбер С.М., Чепков І.Б., Кучинський А.В. Зб. наук. пр. Київ: Центральний наук.-досл. інст. озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2024. № 1(92). С. 134—144.
 13. Russia develops Geran-2 loitering munition with new thermobaric warhead to target fortified positions. Army Recognition. 2024. Oct. Available at: <https://www.armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/conflicts-in-the-world/russia-ukraine-war-2022/russia-develops-geran-2-loitering-munition-with-new-thermobaric-warhead-to-target-fortified-positions> (дата звернення 08.10.2024).
 14. Результати дослідження GSM модуля до безпілотного літального апарату Shahed-136 / Солошенко Ю.В., Купчин А.В., Журба К.І., Джаназян В.В., Васильєв В.А., Чернега В.А. Зб. наук. пр. Київ: Центральний наук.-досл. інст. озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2024. № 3(94). С. 326—337.
- REFERENCES**
1. Kupchin, A.V. (2024). “Dosvid zastosuvannia v khodi rosiisko-ukrainskoi viiny ta perspektvyu rozvytku bezpilotnykh (bezekipazhnykh) aparativ ta robotyzovanykh system” [Experience of use during the russian-Ukrainian war and prospects for the development of unmanned (unmanned) vehicles and robotic systems], coll. of materials of the interdepartmental scientific and practical round table. K.: Central Scientific Research Institute of Armed Forces of Ukraine. P. 55.
 2. Russia upgrades Iran-origin Shahed drones for stealthier, deadlier attacks on Ukraine. Defense Mirror. 2025. July. Available at: <https://www.defensemirror.com/news/39930> (accessed 25 July 2025).
 3. “Holovnyy portal pro sponsoriv ta spivuchasnykiv ahresii. Geran-2” [The main portal about sponsors and accomplices of aggression. Geran-2]. Available at: <https://war-sanctions.gur.gov.ua/ru/uav/379> (accessed 15 October 2025).
 4. Drone wreckage confirms that russian forces employ Iranian Shahed-238 jet-powered drones against Ukraine. 2025. Army Recognition. July. Available at: <https://armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/conflicts-in-the-world/russia-ukraine-war-2022/drone-wreckage-confirms-that-russian-forces-employ-iranian-shahed-238-jet-powered-drones-against-ukraine> (accessed: 09.07.2025).
 5. Russia’s jet-powered Shahed-238 drones introduce new challenges to Ukraine’s air defenses. Army Recognition. 2025. July. Available at: <https://armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/conflicts-in-the-world/russia-ukraine-war-2022/russias-jet-powered-shahed-238-drones-introduce-new-challenges-to-ukraines-air-defenses> (accessed: 02.07.2025).
 6. Russia begins production of jet-powered «Geran-3» drone – a faster, deadlier Shahed-238 clone. United24 Media. Febr., 2025. Available at: <https://united24media.com/latest-news/russia-begins-production-of-jet-powered-geran-3-drone-a-faster-deadlier-shahed-238-clone-6001> (accessed: 18.02.2025).
 7. Kupchyn, A.V., Dovhopoly, A.S., Soloshenko, Yu. V., Zhivotovsky, R.M., Dzanazian, V.V., Zhurba, K.I., Yakovlev, M.Yu., Hurnovych, A.V., Kondrachukov, S.I. & Petruk, S.M. Results of research on the determination of the necessary kinetic energy to impact the SHAHED-136 UAV. Weapons and military equipment. K.: Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 2022–2024. Special iss. Pp. 243—253. <https://doi.org/1034169/2414-0651.243-253>.
 8. Bohdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnoralov, I.V., Kremenytskyi, V.V. & Sperkach, S.O. (2023). “Vyznachennia khimichnogo skladu, struktury ta topografii kompozytsiinykh materialiv korpusu planera barazhuiuchoho boeprypasu «Shahed-136» metodom skanuiuchoi elektronnoi mikroskopii” [Investigation of the chemical storage, structure and topography of composite materials in the case of the «Shahed-136» boarding ammunition airliter by the method of scanning electronic microscopy], Weapons and military equipment. K.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. No 4(40). Pp. 53—61. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.4\(40\).53-61](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.4(40).53-61).
 9. Bohdanov, V.L., Grigorenko, O.Ya., Chepkov, I.B., Odnoralov, I.V., Kuchinsky A. V., Kremenytskyi, V.V. & Sperkach, S.O. “Osoblyvosti khimichnogo skladu, struktury ta topografii kompozytsiinykh materialiv korpusu planeru modernizovanoho barazhuiuchoho boeprypasu «Shahed-136» (chornoho)” [Features of the chemical composition, structure and topography of composite materials of the airframe body of the modernized loitering munition «Shahed-136» (black)], Weapons and military equipment. K.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. No 1(41). Pp. 53—61. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1\(41\).75-82](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1(41).75-82).
 10. “Reaktyvnyi «Shahed» na kytajskomu dvyhuni: na skil'ky «Heran-3» dorozhcha za hvyntovi «Heran-2»” [Jet «Shahed» on a Chinese engine: how much more expensive is the «Geran-3» than the propeller-driven «Geran-2»]. Defens Express. 2025. September. Available at: https://defence-ua.com/news/reaktyvnyj_shahed_na_kitajskomu_dviguni_na_skilki_geran_3_dorozhcha_za_gvintovi_geran_2-20228.html (accessed 25 October 2025).
 11. Kozlov, V.G., Shelemin, Z.K. & Tverdokhibov, V.V. “Otsinka mozhlyvostey bortovykh navihatsiynykh system bezpilotnykh litalnykh aparativ «Shahed-131», «Shahed-136» [Assessment of the capabilities of onboard navigation systems of unmanned aerial vehicles

- «Shahed-131», «Shahed-136»), coll. of scient. works. K.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 2024. №1 (91). Pp. 217—229.
12. Boyko, V.V., Voitenko, Yu.I., Gimber, S.M., Chepkov, I.B. & Kuchinsky, A.R. “Analiz zastosovannya enerhetychnykh dobavok na osnovi mikro- ta nanoporoshkiv metaliv i nemetaliv v zaryadakh vybukhovyykh rechovyh” [Analysis of the use of energy additives based on micro- and nanopowders of metals and non-metals in explosive charges], coll. of scient. works. K.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 2024. №1(92). Pp. 134—144.
13. Russia develops Geran-2 loitering munition with new thermobaric warhead to target fortified positions. Army Recognition. 2024. Oct. Available at: <https://www.armyrecognition.com/focus-analysis-conflicts/army/conflicts-in-the-world/russia-ukraine-war-2022/russia-develops-geran-2-loitering-munition-with-new-thermobaric-warhead-to-target-fortified-positions> (accessed 8 October 2024).
14. Soloshenko, Y.V., Kupchyn, A.V., Zhurba, K.I., Dzhazanazyan, V.V., Vasiliev, V.A. & Chernega, V.A. “Rezultaty doslidzhennia GSM modulia do bezpilotnoho litalnoho aparatu Shahed-136” [Results of research on the GSM module for the Shahed-136 unmanned aerial vehicle], coll. of scientific works. K.: Central Scientific Research Inst. of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. 2024. №3(94), Pp. 326—337.

Kupchyn A.V., Soloshenko Yu.V., Dzanazian V.V., Zhurba K.I.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESIGN AND TECHNICAL FEATURES OF UNMANNED AIRCRAFT «GERAN-2» AND «GERAN-3»

The article presents a comparative analysis of the design and technical features of the Geran-2 and Geran-3 UAVs. The object of the study is the strike-type Geran-2 series UAVs used in modern combat operations. The subject of the study is the design and technical features of the Geran-2 series UAVs (hereinafter «Geran-2») and the Geran-3 series UAVs (hereinafter «Geran-3»), their engineering solutions, functional systems, and the impact of upgrades on combat effectiveness.

The analysis shows that the Geran-3 is a logical evolution of the Geran-2 platform: the basic aerodynamic scheme (delta wing) and the unified technological production standards at the Alabuz plant have been preserved, while a number of significant changes were made to increase speed, endurance, and navigation stability. Structural differences include an enlarged mounting point for the warhead, an added air intake, and a revised powerplant mount — changes that simplify installation and allow integration of different types of munitions. The airframes of both models are made from the same composite materials, providing a balance of strength and low weight.

A key engineering transformation is the transition from the «MD550» piston internal-combustion engine in the Geran-2 to the «Telefly» turbojet engine in the Geran-3. This enables significantly higher speed performance, but is accompanied by an increased thermal signature, reduced flight range. The Geran-3 fuel system includes a high-pressure pump with automatic feed control; high fuel consumption in full-thrust mode reduces the operational radius.

The control system retains the original control units and stabilization algorithms, but a conversion module has been added to integrate the new engine, indicating adaptation of the existing software-and-hardware complex. The power supply uses a segregated scheme: separate circuits for the control systems and for the turbojet engine. An additional battery for the video system increases energy stability and reduces the risk of loss of control during overloads.

The navigation system has been upgraded by using a new CRPA block, «Cometa», with 16 or 12 patches, improving receiver sensitivity and resistance to electronic warfare and spoofing. Integration of GNSS, an inertial measurement unit, and a barometer provides high guidance accuracy even with partial signal loss. A significant innovation in the Geran-3 is the presence of a MIMO mesh modem (Xingkaitech XK-F359), which enables video transmission up to 70 km line-of-sight and, when connected to networks and ground gateways, theoretically unlimited transmission range.

The conclusions highlight the engineering trade-offs: Geran-3 offers higher speed, but reduces flight range and creates new vulnerabilities (thermal detection). The tactical consequence is a shift in use from massed Geran-2 attacks to more targeted high-speed Geran-3 strikes, which are harder to intercept by traditional air-defense systems. The article provides a comprehensive technical justification for these changes and a basis for further risk assessment and countermeasures.

Keywords: Geran-2, Geran-3, unmanned aerial vehicle (UAV), comparative analysis, structural and technical features, control system, turbojet engine, navigation system, airframe, combat employment.

Відомості про авторів:

Купчин Артем Валерійович

доктор філософії
начальник науково-дослідного відділу
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>
e-mail: kupchyn.artem@ukr.net

Солошенко Юрій Вікторович

кандидат технічних наук
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-9268-2813>
e-mail: solyurii@ukr.net

Джаназян Ванік Володимирович

науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-5327-6678>
janazyanv@gmail.com

Журба Костянтин Іванович

молодший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0008-7237-266X>
e-mail: kzhurba@gmail.com

Information about the authors:**Купчун Артем**

Doctor of Philosophy
Chief of the Scientific and Research Department
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>
e-mail: kupchyn.artem@ukr.net

Soloshenko Yurii

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/0009-0002-9268-2813>
e-mail: solyurii@ukr.net

Dzanazian Vanik

Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-5327-6678>
janazyanv@gmail.com

Zhurba Kostiantyn

Junior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-7237-266X>
e-mail: kzhurba@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 30.10.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 623.465.5:623.438:[623.746+623.462.12-519]
DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).48-56](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).48-56)

О. С. КАРПЕНКО, ад'юнкта
<https://orcid.org/0000-0002-7655-4363>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОЇ СИСТЕМИ ПОСТАНОВКИ ПЕРЕШКОД ЗАСОБАМ УРАЖЕННЯ З ТЕЛЕВІЗІЙНОЮ СИСТЕМОЮ НАВЕДЕННЯ

У статті розглянуто задачу протидії засобам ураження з телевізійною системою наведення лазерною системою постановки перешкод у складі системи захисту бойових броньованих машин. На основі формалізації умов функціонування досліджуваної системи та аналізу вхідних і вихідних параметрів, що визначають процес зриву наведення, сформовано просторово-енергетичну модель лазерного випромінювання та отримано узагальнені аналітичні залежності для кількісного опису фотонно-електронних і теплових процесів в оптичному сенсорі. Отримані залежності утворюють математичний апарат методики, яка забезпечує перехід від формалізованих умов застосування до обґрунтування раціональних параметрів лазерної системи постановки перешкод та кількісного оцінювання технічної можливості її інтеграції до складу системи захисту бойових броньованих машин.

Ключові слова: озброєння і військова техніка, бойова броньована машина, захищеність, система захисту, лазерне випромінювання, засоби ураження, безпілотний літальний апарат, телевізійна система наведення.

ВСТУП

Досвід бойового застосування бойових броньованих машин (ББМ) під час відсічі збройної агресії російської федерації проти України свідчить про стале зростання загрози з боку безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що застосовуються в якості засобів ураження (ЗУ) озброєння та військової техніки (ОВТ). Аналіз, проведений в [1], дозволяє стверджувати, що на сучасному етапі розвитку ОВТ відсутні ефективні технічні рішення, здатні забезпечити гарантований захист ББМ від таких засобів.

ЗУ зазначеного типу використовують телевізійну камеру (ТК) для формування та передачі відеозображення, на основі якого оператор або автоматизована система наведення (на основі штучного інтелекту, тощо) здійснює

наведення на ціль, тобто, в них реалізовано телевізійну систему наведення (ТВСН). Критичним елементом їх функціонування є оптичний сенсор (ОС) ТК, порушення роботи якого призведе до зриву процесу наведення і, як наслідок, промаху по цілі [1, 2]. В той же час відомо, що лазерне випромінювання, направлене в апертуру ТК, здатне як засліпити її (порушити функціонування на час впливу випромінювання), так і призвести до безповоротного припинення її функціонування. Це зумовлює підґрунтя для створення системи захисту ББМ від ЗУ з ТВСН на основі лазерного випромінювання (надалі використовується абревіатура ЛСПП – лазерна система постановки перешкод). Цільовою функцією такої системи є зрив наведення ЗУ з ТВСН шляхом дистанційного ураження (пригнічення) його оптико-електронної системи лазерним випромінюванням [3]. Актуальним науковим завданням є створення аналітичного апарату опису взаємодії лазерного випромінювання з ОС ТК ЗУ з ТВСН як теоретичної основи параметричного синтезу характеристик ЛСПП.

Метою статті є розроблення аналітичних залежностей, які описують взаємодію лазерного випромінювання з оптичним сенсором ЗУ з ТВСН в умовах функціонування ЛСПП в складі системи захисту ББМ.

Досягнення поставленої мети зумовлює необхідність розв'язання таких завдань:

1. Формалізація умов функціонування системи «ББМ з ЛСПП – ЗУ з ТВСН» та визначення сукупності вхідних та вихідних параметрів, що впливають на процес впливу лазерного випромінювання на ОС ТК.

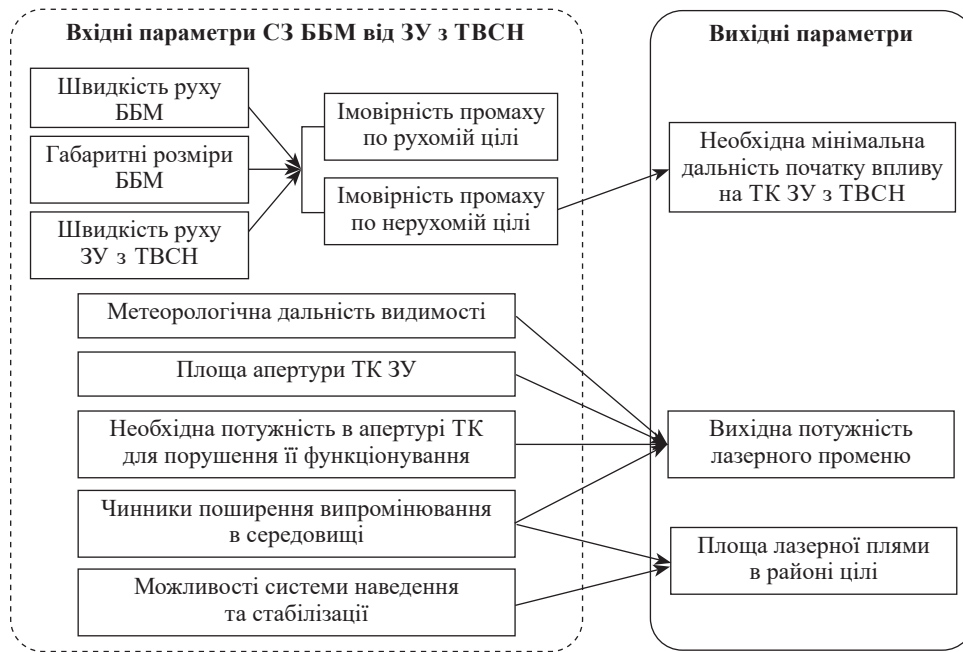
2. Формування просторово-енергетичної моделі лазерного випромінювання з урахуванням фізичних, геометричних та атмосферних чинників, що визначають рівень опромінення ОС ТК ЗУ з ТВСН.

3. Розроблення узагальнених аналітичних моделей взаємодії лазерного випромінювання з ОС ТК ЗУ з ТВСН та на їх основі отримання розрахункових залежностей фотонно-електронних і теплових процесів у фоточутливому шарі з урахуванням геометричних, кінематичних та атмосферних чинників, що визначаються умовами функціонування ЛСПП у складі системи захисту ББМ.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективне застосування лазерного випромінювання для впливу на ТК ЗУ з ТВСН потребує врахування сукупності взаємопов'язаних чинників, зумовлених як умовами застосування ЛСПП у складі ББМ, так і характеристиками ТК ЗУ та середовища поширення випромінювання. Результати декомпозиції процесу функціонування ЛСПП та аналізу чинників, які визначають умови взаємодії лазерного випромінювання з ТК ЗУ з ТВСН дозволили сформулювати систему вхідних і вихідних параметрів, що характеризують процес зриву наведення ЗУ з ТВСН. Структурну взаємозалежність зазначених параметрів наведено на рис. 1.

Наведена структурна схема дає змогу розглядати ЛСПП як об'єкт параметричного синтезу, для якого визначаються аналітичні залежності між вхідними параметрами, що характеризують умови функціонування ЛСПП у складі системи захисту ББМ та вихідними



Р и с . 1. Структурна взаємозалежність вхідних та вихідних параметрів системи захисту ББМ від ЗУ з ТВСН

параметрами лазерного випромінювача. Значення цих параметрів повинні забезпечувати виконання цільової функції ЛСПП, а саме порушення формування інформативності відеозображення, достатнє для зриву наведення на ціль. Розв'язання зазначеної задачі передбачає послідовне формування просторово-енергетичної моделі поширення лазерного випромінювання та моделі його взаємодії з ОС ТК ЗУ з ТВСН.

Вплив лазерного випромінювання на ОС ТК, на оптичні системи приладів прицілювання і спостереження та чутливі елементи приладів нічного бачення досліджується науковцями тривалий час. Результати досліджень [4–6] свідчать, що ОС ТК різних типів (CCD, FSI CMOS та BSI CMOS) характеризуються високою чутливістю до лазерного опромінення. Встановлено, що ступінь пошкодження сенсора визначається його типом та просторово-енергетичними характеристиками випромінювання, зокрема довжиною хвилі, тривалістю та режимом впливу (імпульсне або безперервне випромінювання), енергією імпульсу або щільністю потужності. Водночас в роботах [7–8] показано, що засліплення ОС настає при рівнях опромінення, нижчих за поріг фізичного пошкодження, та зумовлюється перенасиченням пікселів фотонами. Необхідна для засліплення щільність потужності залежить від довжини хвилі опромінення, спектральної чутливості сенсора, ємності насичення його пікселів та наявності інфрачервоних фільтрів в оптичній системі ТК. Таким чином, припинення формування інформативного відеозображення ТК досягається засліпленням ОС (перенасиченням фотонним потоком) або його ураженням, що може реалізовуватися як імпульсним, так і безперервним випромінюванням. Засліплення пов'язане з перевищенням ємності насичення пікселів за час інтеграції, тоді як ураження обумовлюється тепловим руйнуванням фоточутливого шару внаслідок перевищення порогового значення теплової енергії, що формується під дією флюенсу імпульсного або щільнос-

ті потужності безперервного випромінювання. Механізм впливу на ОС визначається типом випромінювання, довжиною хвилі лазерного випромінювання, рівнем його просторової концентрації в районі цілі, параметрами формування пучка, умовами поширення випромінювання та часовими характеристиками впливу. У безперервному режимі ці параметри характеризуються щільністю потужності в апертурі ТК, а в імпульсному – щільністю енергії. Так, відомо, що щільність потужності безперервного випромінювання та щільність енергії імпульсного випромінювання визначаються як відношення потужності (енергії імпульсу) до площі лазерної плями діаметром d та визначаються залежностями:

- для безперервного випромінювання (щільність потужності)

$$I = \frac{P}{S} = \frac{4P}{\pi d^2}; \quad (1)$$

- для імпульсного випромінювання (щільність енергії, флюенс)

$$F = \frac{E}{S} = \frac{4E}{\pi d^2}, \quad (2)$$

де I – щільність потужності випромінювання, Вт/м²;
 F – флюенс (енергетична щільність опромінення), Дж/м²;
 P – потужність випромінювання, Вт;
 E – енергія одного імпульсу, Дж;
 $S = \pi \frac{d^2}{4}$ – площа лазерної плями, м².

Наведені залежності свідчать про те, що визначення діаметру лазерної плями в районі цілі є ключовою передумовою для розрахунку щільності потужності (флюенсу) та вибору параметрів випромінювача ЛСПП.

Слід зазначити, що застосування ЛСПП в складі ББМ обумовлює необхідність врахування динамічних чинників руху об'єкта-носія. У зв'язку з цим формування необхідного рівня опромінення апертури ТК ЗУ

з ТВСН визначається характеристиками системи наведення та стабілізації випромінювача ЛСПП. Значення середньоквадратичної похибки стабілізації приймається відповідно характеристик зразка та використовується як вихідний параметр просторово-енергетичної моделі. Мінімумально необхідний розмір лазерної плями, який забезпечує компенсацію автоколивань променя, зумовлених похибками стабілізації, визначається залежністю:

$$d_{\text{стаб}} = 2L\theta, \quad (3)$$

де L – дальність до цілі, м;

θ – середньоквадратична похибка наведення/стабілізації, рад.

Мінімальна дальність початку впливу лазерного випромінювання, на якій припинення формування зображення забезпечує зрив наведення ЗУ з ТВСН як по стаціонарній, так і по рухомій цілі, визначається за методикою [3] та приймається як вихідний параметр моделі. На цій дальності необхідний рівень щільності випромінювання має забезпечуватися в межах діаметра плями, не меншого за $d_{\text{стаб}}$.

Більшість лазерів формують пучок із гауссівським розподілом інтенсивності, за якого її значення зменшується від осі до країв. Для забезпечення рівномірної щільності випромінювання в межах заданого діаметра плями доцільно застосовувати пучок з плоскою вершиною, що формується дифракційними або фазовими оптичними елементами типу π Shaper. Такі елементи, працюючи з однододововими лазерами, забезпечують колімований пучок, який після фокусування формує пляму з рівномірним або кільцевим розподілом інтенсивності [9].

Відомо, що лазерне випромінювання характеризується вузькою діаграмою спрямованості, що визначається кутовим розходженням променя. Розходження залежить від довжини хвилі та діаметра апертури випромінювача і формує просторово-енергетичний розподіл випромінювання на цілі. Для круглої апертури кутове розходження, зумовлене дифракцією, описується функцією типу «диск Ейрі» та визначається емпіричною залежністю [10].

$$\theta_{\text{пром}} = 1,22 \frac{\lambda}{D_0}, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання, м;

D_0 – діаметр ефективною оптичної діафрагми лазерного випромінювача, м;

1,22 – коефіцієнт першого мінімуму функції Ейрі,

тоді повний діаметр плями випромінювання на цілі на відстані L буде визначатися залежністю

$$d(L) = d_0 + 2L\theta_{\text{пром}} = d_0 + 2L \left(1,22 \frac{\lambda}{D_0} \right), \quad (5)$$

де d_0 – початковий діаметр колімованого пучка на виході формуючої оптики (на виході з апертури), м.

Залежність (5) свідчить, що збільшення діаметра апертури випромінювача зменшує кутове розходження променя. У межах габаритів БМ можливий вибір такого діаметра апертури, який забезпечує необхідний розмір плями в районі цілі з мінімальним зниженням щільності опромінення внаслідок розходження, тому для подальших розрахунків прийнято, що $d_0 = D_0$.

Враховуючи залежності (3)–(5), для компенсації автоколивань лазерного променя та покриття всієї зони можливих відхилень лінії візування внаслідок похибок стабілізації системи наведення повинна виконуватися умова

$$D_0 + 2L \left(1,22 \frac{\lambda}{D_0} \right) \geq 2L\theta = d_{\text{еф}}, \quad (6)$$

де $d_{\text{еф}}$ – ефективний розмір лазерної плями в районі цілі, м.

Слід також зазначити, що окрім кутового розходження на просторово-енергетичні характеристики в районі цілі впливає атмосферне поглинання випромінювання та турбулентність. Відомо [11], що ослаблення електромагнітних хвиль в атмосфері обумовлено розсіюванням та поглинанням енергії випромінювання, а функціонування лазерних систем можливе лише у «вікнах прозорості». До них відноситься діапазон видимого світла та ділянки інфрачервоного діапазону з довжинами хвиль 0,95–1,05; 1,15–1,35; 1,5–1,8; 2,1–2,4; 3,3–4,2; 4,5–5,1; 8–13 мкм.

Ослаблення електромагнітних хвиль середовищем, яке має коефіцієнт ослаблення α , км⁻¹, на дальності L , км, характеризується законом Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha L} = \Phi_0 \tau, \quad (7)$$

де Φ – потік на виході з середовища;

Φ_0 – потік на вході в середовище;

$\tau = e^{-\alpha L}$ – коефіцієнт пропускання середовища.

Коефіцієнт ослаблення потоку α для певної довжини хвилі визначається емпіричною залежністю

$$\alpha = \frac{3,91}{\gamma} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,585\gamma^3}, \quad (8)$$

де γ – метеорологічна дальність видимості, км;

λ – довжина хвилі, мкм.

Для розрахунку коефіцієнта пропускання середовища приймається значення метеорологічної дальності видимості, що відповідає несприятливим погодним умовам, характерним для граничних режимів застосування ЗУ з ТВСН. Згідно міжнародної шкали видимості [12], таким умовам відповідають атмосферні явища, пов'язані з інтенсивними опадами або підвищеною запиленістю та серпанком. Врахування зазначених умов дозволяє оцінювати поширення лазерного випромінювання у середовищі, близькому до граничного за прозорістю для ОС, що функціонують у видимому спектрі електромагнітного випромінювання.

Турбулентність атмосфери проявляється розширенням пучка, блуканням осі пучка та часово-просторовими флуктуаціями інтенсивності (сцинтиляціями) [13]. Для опису впливу турбулентності на поширення колімованого пучка у приземному шарі атмосфери використовують параметр Фріда $r_0(\lambda, L)$, який характеризує ступінь турбулентного спотворення хвильового фронту та визначається виразом [14],

$$r_0(\lambda, L) = \left(0,423k^2 C_n^2 \right)^{-3/5}, \quad (9)$$

де $r_0(\lambda, L)$ – параметр Фріда (діаметр когерентності) на відрізьку довжиною L ;

C_n^2 – структурна характеристика показника заломлення атмосфери, згідно з [13] для умов слабкої та сильної турбулентності $C_n^2 = (10^{-17} \dots 10^{-13}) \text{ м}^{-2/3}$;

L – довжина траси лазерного випромінювання;

$k = \frac{2}{\lambda}$ – хвильове число;

λ – довжина хвилі лазерного випромінювання.

У роботі [15] для оцінювання впливу турбулентності на поперечний розмір лазерної плями використано математичну залежність для довготривалого радіуса колімованого гауссівського пучка:

$$W_{LT}^2 = W_0^2 \left(1 + \frac{L^2}{Z_0^2} \right) + 2 \left(\frac{4L}{kr_0} \right)^2, \quad (10)$$

де W_{LT} – довготривалий радіус пучка в площині цілі;

W_0 – початковий радіус пучка;

Z_0 – параметр Релея;

$2 \left(\frac{4L}{kr_0} \right)^2$ – доданок, який описує додаткове розширення пучка внаслідок впливу турбулентності; його величина визначається значенням параметра Фріда r_0 .

Оскільки залежність (10) отримана для колімованого гауссівського пучка, у межах цієї статті її використано як наближений аналітичний вираз для оцінювання впливу турбулентності на поперечний розмір лазерної плями також і у випадку пучка з рівномірним розподілом інтенсивності. Таким чином, для прийнятих умов моделювання вплив турбулентності на розширення лазерної плями оцінюється за співвідношеннями (9) – (10) та за результатами цієї оцінки приймається рішення щодо доцільності урахування додаткового розширення пучка під час розрахунку ефективного розміру лазерної плями в районі цілі.

Блукання осі пучка в площині цілі визначається за середньоквадратичним зміщенням центра пучка залежністю

$$\sigma_r = \sqrt{\langle r_c^2 \rangle}, \quad (11)$$

де σ_r – середньоквадратичне зміщення осі пучка відносно заданого напрямку;

$\langle r_c^2 \rangle$ – математичне очікування квадрата зміщення осі пучка, для колімованого променя визначається як [13]

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 \omega_0^{-1/3}, \quad (12)$$

де ω_0 – радіус променя на виході з випромінювача.

Для прийнятих умов моделювання значення σ_r визначається за співвідношеннями (11) – (12) та за результатами оцінювання встановлюється доцільність урахування блукання осі пучка при визначенні ефективного розміру лазерної плями в районі цілі. Часово-просторові флуктуації інтенсивності лазерного випромінювання в турбулентній атмосфері описуються дисперсією Ритова [13]:

$$\sigma_R^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (13)$$

де σ_R^2 – дисперсія Ритова.

У режимі слабких флуктуацій, при якому нормована дисперсія інтенсивності (сцинтиляційний індекс) σ_I^2 наближено дорівнює σ_R^2 , а миттєве відносне середньоквадратичне відхилення інтенсивності визначається як

$$\sigma_I \approx \sqrt{\sigma_R^2}, \quad (14)$$

де σ_I – миттєве відносне відхилення інтенсивності.

Згідно з [16], у приземному шарі атмосфери характерна частота турбулентних флуктуацій інтенсивності становить близько 100 Гц. Це відповідає оцінці часу кореляції сцинтиляцій порядку $t_{\text{кор}} \sim 10^{-2}$ с. Цей часовий масштаб визначає характерну тривалість зміни структури інтенсивності лазерної плями в районі цілі. Таким чином, вплив сцинтиляцій визначається співвідношенням між часом опромінення ОС ТК та часом кореляції турбулентності. Якщо протягом часу інтеграції реалізується $N \approx t_{\text{інт}}/t_{\text{кор}}$ статистично незалежних станів турбулентності, то ефективний рівень флуктуацій середньої інтенсивності визначається як

$$\sigma_{I_{\text{еф}}} \approx \frac{\sigma_I}{\sqrt{N}} = \sigma_I \sqrt{\frac{t_{\text{кор}}}{t_{\text{інт}}}}, \quad (15)$$

де $\sigma_{I_{\text{еф}}}$ – відносне середньоквадратичне відхилення середньої інтенсивності за час інтеграції;

σ_I – миттєве відносне середньоквадратичне відхилення інтенсивності;

$t_{\text{кор}}$ – характерний час кореляції сцинтиляцій;

$t_{\text{інт(впл)}}$ – час опромінення (інтеграції) ОС ТК.

Так, для ураження ОС безперервним випромінюванням при тривалості $t_{\text{впл}} \gg t_{\text{кор}}$ реалізується велика кількість статистично незалежних станів турбулентності, отже, ефективне відхилення середньої інтенсивності зменшується пропорційно $\sqrt{t_{\text{кор}}/t_{\text{впл}}}$. За таких умов флуктуації інтенсивності статистично усереднюються, а їх впливом на інтегральну теплову енергію можна знехтувати.

Водночас для ураження ОС імпульсним випромінюванням, де $t_{\text{імпл}} \sim 10^{-8} \dots 10^{-9}$ с та для засліплення ОС безперервним випромінюванням, де визначальним є час інтеграції одного кадру (умовами моделювання приймаємо мінімальну електронну витримку сучасних CMOS-сенсорів $t_{\text{інт}} = 10^{-5}$ с [17]) виконується умова $t_{\text{інт}} \ll t_{\text{кор}}$, отже усереднення інтенсивності відсутнє. В такому випадку фактичний флюенс (щільність потужності) може відхилятися від розрахункового середнього значення, що потребує введення коефіцієнта запасу пікової інтенсивності $K_{\text{турб}}$, величина якого визначається на основі оціненого значення миттєвого відносного відхилення інтенсивності σ_I .

Разом з тим варто врахувати, що на рівень опромінення ОС ТК ЗУ з ТВСН, окрім ослаблення випромінювання внаслідок атмосферного поглинання та турбулентності, впливає такий чинник, як відношення площі лазерної плями в районі цілі до ефективної приймальної апертури ТК. Тоді, з урахуванням (1), (2), потужність випромінювання (енергія імпульсу), що потрапляє в апертуру ТК, виражається як $P_{\text{ап}} = I(\lambda, L, d_{\text{еф}}) S_{\text{ап,еф}}$ та $E_{\text{ап}} = F(\lambda, L, d_{\text{еф}}) S_{\text{ап,еф}}$ відповідно.

Також відомо, що у разі надходження випромінювання в апертуру ТК під певним кутом відносно її оптичної осі ефективна збиральна площа апертури зменшується пропорційно косинусу цього кута [18]. Тоді збиральна площа апертури визначається як проекція її геометрич-

ної площі на напрямок поширення випромінювання та описується співвідношенням $S_{\text{ан,еф}} = S_{\text{ан}} \cos \varphi$. З урахуванням наведених вище чинників, потужність випромінювання (флюенсу) в апертурі ТК визначатиметься залежностями

$$P_{\text{ан}} = \frac{4P\tau(\lambda, L)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ан}} \cos \varphi; \quad (16a)$$

$$E_{\text{ан}} = K_{\text{турб}} \frac{4E\tau(\lambda, L)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ан}} \cos \varphi, \quad (16b)$$

де $P_{\text{ан}}$ – потужність випромінювання в апертурі ОС ТК, Вт;

$E_{\text{ан}}$ – енергія імпульсу в апертурі ОС ТК, Дж;

Сформовані залежності (16a) та (16b) дозволяють визначити потужність безперервного випромінювання та енергію імпульсу, що надходять в апертуру ТК ЗУ з ТВСН, з урахуванням геометричних параметрів пучка, кута надходження випромінювання, похибок стабілізації та атмосферних чинників.

Відомо [19], що ОС ТК функціонують за принципом перетворення енергії фотонів у електричний сигнал. Водночас, з урахуванням квантової природи світла та принципу функціонування лазера як джерела когерентного випромінювання [20], лазерний промінь розглядається як організований потік фотонів, а енергія випромінювання визначається кількістю фотонів та енергією одного фотона і описується залежністю [21]:

$$E_{\text{лаз}} = NE_{\text{ф}} = N \frac{hc}{\lambda}, \quad (17)$$

де $E_{\text{лаз}}$ – енергія лазерного випромінювання, Дж;

$E_{\text{ф}}$ – енергія одного фотона, Дж;

N – кількість фотонів;

$h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка;

$c = 3 \times 10^8$ м/с – швидкість світла;

λ – довжина хвилі випромінювання, м,

а потужність випромінювання рівнянням

$$P = \frac{E_{\text{лаз}}}{t}, \quad (18)$$

де P – потужність випромінювання, Вт

t – тривалість випромінювання. Тоді при сталому значенні потужності кількість фотонів, що випромінюється за одиницю часу визначається як

$$N = \frac{P}{E_{\text{ф}}} = \frac{P\lambda}{hc}. \quad (19)$$

Для імпульсного режиму енергія імпульсу визначається залежністю

$$E_{\text{имп}} = P_{\text{имп}} t_{\text{имп}}. \quad (20)$$

Розглядаючи можливість зриву наведення ЗУ з ТВСН шляхом засліплення (ураження) його ОС слід зазначити, що кількість електронів, що генерується пікселем, визначається його квантовою ефективністю. Квантова ефективність $QE(\lambda)$ визначає частку фотонів, що спричиняють утворення електронів у фоточутливому шарі, тому кількість електронів, згенерованих унаслідок фото-ефекту, пропорційна кількості фотонів, що надходять на

сенсор, та $QE(\lambda)$, що у загальному вигляді описується залежністю [22]:

$$N_e(\lambda) \propto QE(\lambda) N_{\text{ф}}(\lambda), \quad (21)$$

де $N_e(\lambda)$ – кількість електронів, згенерованих у фоточутливому шарі;

$N_{\text{ф}}(\lambda)$ – кількість фотонів, що надходять на сенсор за заданий інтервал часу. Оскільки кількість фотонів при сталій потужності виражається виразом (19), кількість фотонів, що припадає на одиницю часу, змінюється пропорційно до довжини хвилі

$$N_{\text{ф}}(\lambda) \propto \lambda. \quad (22)$$

В той же час відомо, що під час взаємодії електромагнітного випромінювання з фоточутливим шаром ОС поглинута енергія розподіляється між генерацією електрон-діркових пар і тепловими втратами [23]. Частка фотонів, пропорційна $QE(\lambda)$, бере участь у фотоелектричному ефекті, причому на генерацію одного електрона витрачається енергія, рівна енергії забороненої зони E_g . Надлишкова енергія фотона ($E_{\text{ф}}(\lambda) - E_g$), а також енергія фотонів, що не спричиняють генерацію електронів (при $QE(\lambda) < 1$ або поза спектральною чутливістю), переходять у тепло через коливання кристалічної решітки. Частка енергії фотона, що витрачається на генерацію електрона, визначається виразом [23]

$$\eta_{\text{ген}}(\lambda) = \frac{E_g}{E_{\text{ф}}(\lambda)}, \quad (23)$$

де $\eta_{\text{ген}}(\lambda)$ – частка енергії одного фотона, що витрачається на генерацію електрона;

E_g – енергія забороненої зони матеріалу фоточутливого шару, тоді частка енергії фотона, що переходить у тепло, відповідно

$$\eta_{\text{тепл}}(\lambda) = 1 - \eta_{\text{ген}}(\lambda) = 1 - \frac{E_g}{E_{\text{ф}}(\lambda)} = 1 - \frac{E_g \lambda}{hc}. \quad (24)$$

Враховуючи те, що лише частка поглинутих фотонів $QE(\lambda)$ бере участь у фотоелектричному ефекті, узагальнений вираз для теплової енергії, що виділяється у фоточутливому шарі сенсора від кількості фотонів, що надходять на сенсор за заданий інтервал часу, має вигляд

$$E_{\text{тепл}}(\lambda) = N_{\text{ф}}(\lambda) E_{\text{ф}}(\lambda) (1 - QE(\lambda) \eta_{\text{ген}}(\lambda)), \quad (25)$$

де $E_{\text{тепл}}(\lambda)$ – сумарна енергія, що переходить у тепло при поглинанні $N_{\text{ф}}(\lambda)$ фотонів, Дж;

$N_{\text{ф}}(\lambda)$ – кількість фотонів, що потрапляють на сенсор за одиницю часу, визначається за залежністю (19).

З урахуванням співвідношень (16a), (16b), (21) та (23) – (25) формуються узагальнені залежності кількості згенерованих електронів і теплової енергії в ОС як функцій довжини хвилі та параметрів поширення променя. Оскільки фотонний потік, що надходить на ОС, додатково обмежується пропусканням оптичної системи ТК $\tau_{\text{опт}}(\lambda)$ [24], енергія, що потрапляє на сенсор за час інтеграції, визначається виразом

$$E_{\text{сенси}} = \frac{4P\tau(\lambda) \tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ан}} \cos \varphi t_{\text{инт}} K_{\text{турб}}. \quad (26)$$

де $E_{\text{сенс}}$ – енергія випромінювання, що потрапляє на сенсор, Дж;

$S_{\text{ап}}$ – площа апертури телевізійної камери, м^2 ;

$t_{\text{інт}}$ – час інтеграції ОС ТК (застосовується для оцінювання кількості фотонів), с;

$\tau_{\text{опт}}(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання оптичної системи ТК;

$K_{\text{турб}}$ – коефіцієнт запасу на турбулентні флуктуації інтенсивності: у режимі засліплення, коли $t_{\text{інт}} \ll t_{\text{кор}}$, приймається $K_{\text{турб}} > 1$ (визначається на основі оціненого значення σ_I); для функціонування ЛСПП в режимі ураження ОС ТК ЗУ з ТВСН безперервним випромінюванням, коли $t_{\text{впл}} \gg t_{\text{кор}}$, приймається $K_{\text{турб}} = 1$, адже флуктуації інтенсивності усереднюються.

Кількість фотонів, які надходять на ОС за $t_{\text{інт}}$, становить

$$N_{\text{ф}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \frac{E_{\text{сенс}}(\lambda, L, d_{\text{еф}})}{E_{\text{ф}}(\lambda)} = E_{\text{сенс}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) \frac{\lambda}{hc}. \quad (27)$$

Тоді з урахуванням (26) отримуємо

$$N_{\text{ф}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \frac{4P\tau(\lambda)\tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)}, \quad (28)$$

$$S_{\text{ап}} \cos \varphi_{i_{\text{інт}}} \frac{\lambda}{hc} K_{\text{турб}}$$

Кількість електронів, згенерованих у фоточутливому шарі сенсора з урахуванням квантової ефективності $QE(\lambda)$, визначається виразом (21). Тоді, з врахуванням залежності (28), визначатиметься виразом

$$N_e(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = QE(\lambda) N_{\text{ф}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) =$$

$$= QE(\lambda) \frac{4P\tau(\lambda)\tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ап}} \cos \varphi_{i_{\text{інт}}} \frac{\lambda}{hc} K_{\text{турб}}. \quad (29)$$

Кількість енергії, що виділяється у фоточутливому шарі сенсора за час впливу випромінювання у вигляді тепла, визначається виразом (25), тоді теплова енергія, що виділяється у фоточутливому шарі сенсора за час впливу, визначається як

$$E_{\text{тепл}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \left(1 - QE(\lambda) \frac{E_g \lambda}{hc}\right) E_{\text{сенс}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}), \quad (30)$$

а з урахуванням (26):

$$E_{\text{тепл}}(\lambda, L, d_{\text{еф}}) = \left(1 - QE(\lambda) \frac{E_g \lambda}{hc}\right) \frac{4P\tau(\lambda)\tau_{\text{опт}}(\lambda)}{\pi d_{\text{еф}}^2(\lambda, L, D_0, \theta)} S_{\text{ап}} \cos \varphi_{i_{\text{впл}}}, \quad (31)$$

де $t_{\text{впл}}$ – час впливу випромінювання на ОС (застосовується в тепловій моделі впливу на ОС).

Отримані залежності (29) та (31) дозволяють кількісно оцінювати число електронів, згенерованих ОС ТК, а також теплову енергію, що виділяється у фоточутливому шарі під дією лазерного випромінювання в умовах функціонування ЛСПП в складі системи захисту ББМ. Урахування чинників, які впливають на надходження випромінювання в апертуру ТК, дозволяє виконувати моделювання як фотонно-електронних процесів, так і теплових навантажень в ОС.

ВИСНОВКИ

У статті розроблено узагальнений аналітичний апарат опису взаємодії лазерного випромінювання з ОС ТК ЗУ з ТВСН в умовах функціонування ЛСПП у складі системи захисту ББМ.

У межах проведеного дослідження формалізовано умови функціонування системи «ББМ з ЛСПП – ЗУ з ТВСН» як об'єкта параметричного синтезу та визначено сукупність взаємопов'язаних вхідних і вихідних параметрів, що визначають процес зриву наведення. Встановлено, що для зриву наведення ЗУ з ТВСН вихідні енергетичні характеристики випромінювача ЛСПП мають визначатися з урахуванням просторово-енергетичних параметрів пучка, геометрії взаємного розташування об'єктів, похибок наведення та стабілізації, атмосферного ослаблення, чинників впливу турбулентності та характеристик оптичної системи та ОС ТК ЗУ.

Отримані залежності (29) та (31) утворюють математичний апарат методики, яка забезпечує перехід від формалізованих умов функціонування в системі «ББМ з ЛСПП – ЗУ з ТВСН» до кількісної оцінки фотонно-електронних та теплових процесів в ОС. Застосування розроблених моделей дає змогу обґрунтувати раціональні параметри ЛСПП для формування ефективних оптичних перешкод телевізійним системам наведення ЗУ та здійснювати кількісне оцінювання технічної можливості інтеграції ЛСПП до складу системи захисту ББМ з врахування сукупності взаємопов'язаних чинників, зумовлених як умовами застосування ЛСПП у складі ББМ, так і характеристиками ТК ЗУ та середовища поширення випромінювання.

Сформований аналітичний апарат є теоретичною основою параметричного синтезу характеристик випромінювача ЛСПП у складі системи захисту ББМ та створює підґрунтя для обґрунтування раціональних значень параметрів системи захисту ББМ від ЗУ з ТВСН з урахуванням реальних умов застосування.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Karpenko, O.S. Analysis of the effectiveness of armored combat vehicles protection systems against destruction means with a television guidance. *Озброєння та військова техніка*. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2024. № 4(44). С. 19–25. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4\(44\).19-25](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4(44).19-25).
2. Карпенко О.С., Кучинський А.В. Аналіз особливостей функціонування засобів ураження з телевізійною системою наведення та їх можливостей щодо ураження бойових броньованих машин. *Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України*. 2024. № 2(93). С. 85–93.
3. Карпенко О.С. Методика визначення мінімальної дальності дії лазерної системи постановки перешкод засобам ураження з телевізійною системою наведення. *Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України*. 2025. № 2(97). С. 34–42. Інв. 6210цт.
4. Visible-Band Nanosecond Pulsed Laser Damage Thresholds of Silicon 2D Imaging Arrays. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2526> (accessed 20.11.2024).
5. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-opto-electro-mechanical systems. Available at:

- <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9987/1/Laser-induced-damage-threshold-of-camera-sensors-and-micro-opto/10.1117/12.2241057.full> (accessed 20.11.2024).
6. Damage thresholds of silicon-based cameras for in-band and out-of-band laser exposures. Available at: <https://opg.optica.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-61-10-2473&id=470599> (accessed 20.11.2024).
 7. Visible and near-infrared laser dazzling of CCD and CMOS cameras. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10797/107970S/Visible-and-near-infrared-laser-dazzling-of-CCD-and-CMOS/10.1117/12.2325631.full> (accessed 23.04.25).
 8. Comparison of 632nm laser dazzling effect on CCD and CMOS image sensors. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13283/1328340/Comparison-of-632nm-laser-dazzling-effect-on-CCD-and-CMOS/10.1117/12.3037275.full> (accessed 23.04.25).
 9. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромінювання: монографія. Харків: Факт. 2021. 145 с.
 10. Конончук Ю. М. Вступ до Фур'є-оптики : навч. посіб. Київ : Київський нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. 2021. 128 с.
 11. Боллошин И. А., Быков В. В., Васин В. В. и др. Справочник по радиоэлектронным системам : в 2 т. / под ред. Б. Х. Кривицкого. М. : Энергия. 1979. Т. 2. С. 262—264.
 12. Бурштинська Х. В., Бабушка А. В. Вплив атмосфери на послаблення лазерного променя при скануванні місцевості. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2013. Вип. 78. С. 49—53.
 13. Andrews, L. C. & Phillips, R. L. (2005). *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham: SPIE Press. 782 p.
 14. Methods of Atmospheric Coherence Length Measurement. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/6/2980> (accessed 29.09.25).
 15. Dios, F., Rubio, J. A., Rodriguez, A. & Comeron, A. (2004). Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. *Applied Optics*. Vol. 43. No. 19. Pp. 3866–3873. Available at: https://www.researchgate.net/publication/8457996_Scintillation_and_beam-wander_analysis_in_an_optical_ground_station-satellite_uplink (accessed 01.10.25). <https://doi.org/10.1364/AO.43.003866>.
 16. Nicolas Perlot & Daniel Fritzsche. Aperture averaging: theory and measurements. <https://doi.org/10.1117/12.528901> (accessed 30.10.25).
 17. DH-IPC-HFW4431E-SE 4MP WDR IR Mini Bullet Network Camera. Available at: https://www.dahuasecurity.com/asset/upload/download/DH-IPC-HFW4431E-SE_Datasheet_201707181.pdf (accessed 17.12.2025).
 18. Назаренко Л. А., Сорокін В. М. Основи радіометрії та фотометрії : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2014. 352 с.
 19. Елементна база електронних апаратів. Ч. 5. Оптоелектронні компоненти / Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В. та ін.; під заг. ред. М. А. Філінюка, О. О. Лазарєва. Вінниця : ВНТУ. 2018. 116 с.
 20. Тимчик Г.С. Лазерні технології. Конспект лекцій: навч. посіб. Київ: КПІ ім. І. Сікорського. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/23410748-deb0-49e1-91d4-cbfa4503eec8/content> (дата звернення: 30.10.25).
 21. Тимчик Г.С., Богатирьова Г.В., Мамута М.С. Лазерні технології. Практикум : навч. посіб. Київ: КПІ ім. І. Сікорського. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a33f1d3b-8a95-44e0-851a-1fbc47389bec/content> (дата звернення: 30.10.25).
 22. EMVA1288 Standard. Available at: <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf> (accessed 17.12.25).
 23. Царенко О.М. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навч. посіб. Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. 2011. 243 с.
 24. Edmund Optics. TECHSPEC® Lens Transmission Data (400–700 nm). Available at: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/lens-coatings/> (accessed 17.12.2025).

REFERENCES

1. Karpenko, O.S. (2024). Analysis of the effectiveness of armored combat vehicles protection systems against destruction means with a television guidance. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. K.: CSRI AME AFU. № 4(44). Pp. 19—25. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4\(44\).19-25](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4(44).19-25).
2. Karpenko, O.S. & Kuchynskyi, A.V. (2024). “Analiz osoblyvostei funktsionuvannia zasobiv urazhennia z televiziinoiu systemoiu navedennia ta yikh mozhlyvostei shchodo urazhennia boiovykh bronovanykh mashyn” [Analysis of the functional features of weapons equipped with television guidance systems and their capabilities to engage armored fighting vehicles], *zb. nauk. pr. K.: CSRI AME AFU*. № 2(93). Pp. 85—93. Inv. 6119tst.
3. Karpenko, O.S. (2025). “Metodyka vyznachennia minimalnoi dalnosti dii lazernoi systemy postanovky pereshkod zasobam urazhennia z televiziinoiu systemoiu navedennia” [Method for determining the minimum operating range of a laser countermeasure system against weapons with a television guidance system], *zb. nauk. pr. K.: CSRI AME AFU*. № 2(97). Pp. 34—42. Inv. 6210tst.
4. Visible-Band Nanosecond Pulsed Laser Damage Thresholds of Silicon 2D Imaging Arrays. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2526> (accessed 20.11.2024).
5. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-opto-electro-mechanical systems. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9987/1/Laser-induced-damage-threshold-of-camera-sensors-and-micro-opto/10.1117/12.2241057.full> (accessed 20.11.2024).
6. Damage thresholds of silicon-based cameras for in-band and out-of-band laser exposures. Available at: <https://opg.optica.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-61-10-2473&id=470599> (accessed 20.11.2024).
7. Visible and near-infrared laser dazzling of CCD and CMOS cameras. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10797/107970S/>

- Visible-and-near-infrared-laser-dazzling-of-CCD-and-CMOS/10.1117/12.2325631.full (accessed 23.04.25).
8. Comparison of 632nm laser dazzling effect on CCD and CMOS image sensors. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13283/1328340/Comparison-of-632nm-laser-dazzling-effect-on-CCD-and-CMOS/10.1117/12.3037275.full> (accessed 23.04.25).
 9. Machehkin, Yu.P. & Hnatenko, O.S. (2021). “Lazerni, optyko-elektronni prylady ta systemy. Ch. 2. Parametry lazernoho vyprominiuvannia: monohrafiia” [Laser, optoelectronic devices and systems. P. 2. Parameters of laser radiation: monograph]. Kharkiv: Fakt. 145 p.
 10. Kononchuk, Yu.M. (2021). “Vstup do Furie-optyky: navch. posib” [Introduction to Fourier optics: Study guide]. K.: Kyivskiy nats. un-t im. Tarasa Shevchenka. 128 p.
 11. Boloshin, I.A., Bykov, V.V., Vasin, V.V. i dr. (1979). “Spravochnik po radioelektronnym sistemam: v 2 t. / pod red. B.Kh. Krivitskogo” [Handbook of radioelectronic systems: in 2 vols. / ed. by B. Kh. Krivitsky]. M.: Energiia. Vol. 2. Pp. 262—264.
 12. Burshtynska, Kh.V. & Babushka, A.V. (2013). “Vplyv atmosfery na poslablennia lazernoho promenia pry skanuvanni mistsevosti. Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznmannia” [Influence of the atmosphere on the attenuation of a laser beam during terrain scanning. Geodesy, cartography and aerial photography]. Vyp. 78. Pp. 49—53.
 13. Andrews, L. C. & Phillips, R. L. (2005). Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE Press. 782 p.
 14. Methods of Atmospheric Coherence Length Measurement. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/6/2980> (accessed 29.09.25).
 15. Dios, F., Rubio, J. A., Rodriguez, A. & Comeron, A. (2004). Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink. Applied Optics. Vol. 43. No. 19. Pp. 3866—3873. Available at: https://www.researchgate.net/publication/8457996_Scintillation_and_beam-wander_analysis_in_an_optical_ground_station-satellite_uplink (accessed 01.10.25). <https://doi.org/10.1364/AO.43.003866>.
 16. Nicolas Perlot & Daniel Fritzsche. Aperture averaging: theory and measurements. <https://doi.org/10.1117/12.528901> (accessed 30.10.25).
 17. DH-IPC-HFW4431E-SE 4MP WDR IR Mini Bullet Network Camera. Available at: https://www.dahuasecurity.com/asset/upload/download/DH-IPC-HFW4431E-SE_Datasheet_201707181.pdf (accessed 17.12.2025).
 18. Nazarenko, L.A. & Sorokin, V.M. (2014). “Osnovy radiometrii ta fotometrii: monohrafiia” [Fundamentals of radiometry and photometry: monograph]. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova. 352 p.
 19. Filyniuk, M.A., Lazariiev, O.O., Voitsekhovska, O.V. ta in. (2018). “Elementna baza elektronnykh aparativ. Ch. 5. Optoelektronni komponenty” [Electronic components of devices. P. 5. Optoelectronic components]; pid zah. Red. M.A. Filyniuka, O.O. Lazariieva. Vinnytsia: VNTU. 116 p.
 20. Tymchyk, H.S. “Lazerni tekhnolohii. Konspekt lektsii: navch. posib.” [Laser technologies. Lecture notes: study guide]. K.: KPI im. I. Sikorskoho. Available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/23410748-deb0-49e1-91d4-cbfa4503eccc8/content> (available at: 30.10.2025).
 21. Tymchyk, H.S., Bohatyrova, H.V. & Mamuta, M.S. “Lazerni tekhnolohii. Praktykum: navch. posib” [Laser technologies. Practical course: study guide]. K.: KPI im. I. Sikorskoho. Available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a33f1d3b-8a95-44e0-851a-1fbc47389bec/content> (accessed 30.10.2025).
 22. EMVA1288 Standard. Available at: <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf> (accessed 17.12.25).
 23. Tsarenko, O.M. (2011). “Osnovy fizyky napivprovodnykiv i napivprovodnykovykh pryladiv: navchalnyi posibnyk” [Fundamentals of semiconductor physics and semiconductor devices: study guide]. Kirovohrad: RVV KDPU im. V. Vynnychenka. 243 p.
 24. Edmund Optics. TECHSPEC® Lens Transmission Data (400–700 nm). Available at: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/lens-coatings/> (accessed 17.12.2025).

Karpenko O.S.

**METHODOLOGY FOR DETERMINING
THE ENERGY PARAMETERS OF A LASER
COUNTERMEASURE SYSTEM AGAINST
WEAPON SYSTEMS WITH A TELEVISION
GUIDANCE SYSTEM**

The article proposes a methodology for determining the energy characteristics of a laser countermeasure system against weapon systems equipped with a television guidance system as part of the protection system of armored combat vehicles. The objective of the study is to develop an analytical framework that enables the justification of the parameters of a laser countermeasure system required to ensure the disruption of the guidance process. To achieve this objective, the following tasks were addressed: formalization of the system operating conditions “armored combat vehicle with a laser countermeasure system – a weapon system with a television guidance system”; identification of a set of interrelated input and output parameters that determine the requirements for the laser countermeasure system; and establishment of an analytical relationship between the spatial and energy characteristics of the laser beam, the parameters of the aiming and stabilization system, the relative geometry between the interacting objects, atmospheric conditions, the characteristics of the receiving optical system, and the quantitative indicators of photoelectric and thermal processes in the optical sensor.

Based on the generalized description of the interaction between laser radiation and the television camera of a weapon system, analytical relationships were obtained for determining the energy delivered to the sensor, the number of generated electrons, and the thermal energy in the photosensitive layer. The proposed relationships form the computational core of the methodology and enable the transition from formalized operating conditions to the

justification of rational energy parameters of the laser countermeasure system and to the quantitative assessment of the feasibility of its integration into the protection system of armored combat vehicles.

Keywords: *armament and military equipment, armored combat vehicle, survivability, protection system, laser radiation, weapon systems, unmanned aerial vehicle, television guidance system.*

Відомості про автора:

Карпенко Олександр Сергійович

ад'юнк

Центральний науково-дослідний інститут озброєння

та військової техніки Збройних Сил України

м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7655-4363>

e-mail: karpo.tank@ukr.net

Information about the author:

Karpenko Oleksandr

PhD Candidate

Central Scientific Research Institute of Armament and

Military Equipment

of Armed Forces of Ukraine.

Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-7655-4363>

e-mail: karpo.tank@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 04.02.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 002.5:004 + 331.101.1:004 + 004.82 + 004.91 + 005.94
DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).57-64](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).57-64)

О. Є. СТРИЖАК, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4954-3650>

Г. М. ПОТАПОВ, кандидат військових наук
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-5778-9327>

М. П. СЕНЬ, кандидат політичних наук
<https://orcid.org/0000-0001-6964-622X>

О. О. КОЧАРЯН, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-3164-0129>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

В. В. ПРИХОДНЮК, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-2108-7091>
(Національний центр «Мала академія наук України», м. Київ)

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА ПЛАТФОРМА АНАЛІЗУ ЕЛЕМЕНТІВ УЛАМКІВ КРИЛАТОЇ РАКЕТИ ЗМ14 РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСУ «КАЛІБР»

У статті визначено важливість та актуальність проблем, які виникають під час досліджень уламків озброєння та військової техніки противника в умовах воєнного стану. Обґрунтовано науковість досліджень елементів уламків крилатої ракети ЗМ14 ракетного комплексу «Калібр», визначено порядок і особливості досліджень. Дослідження елементів уламків крилатої ракети ЗМ14 пропонується проводити із використанням математичного апарату та спроможностями інтелектуальної інформаційної платформи. Основу побудови такої платформи становить когнітивна інформаційна технологія «КІТ-Поліедр». Використання зазначеної технології дозволяє сформулювати на основі консолідації інформації сукупність інтерактивних документів, яка надходить у форматі системно-інтегрованих різноманітних інформаційних ресурсів у ході дослідження уламків крилатої ракети ЗМ14 ракетного комплексу «Калібр» і наративи якої наділені ознаками достовірності, повноти, цілісності та часткової несуперечності.

Ключові слова: дослідження елементної бази, інтелектуальна інформаційна платформа, мала мовна модель, онтологія, крилата ракета, структуризація масивів інформаційних процесів, таксономія.

ВСТУП

Для вивчення технічних рішень, що використовуються в зразках озброєння рф, проводяться дослідження, які охоплюють уламки зразків озброєння та військової техніки (ОВТ). Для проведення досліджень має створюватись відповідна система, яка матиме сили і засоби, затверджену структуру та обґрунтовані методологічні засади їх проведення. Проведений аналіз її стану дозволяє стверджувати, що нині цьому питанню приділяється значна увага [1–7], але системного підходу до вирішення зазначених питань не розроблено.

У [2] визначено важливість та актуальність проблем, які виникають під час досліджень трофейних зразків озброєння та військової техніки в умовах воєнного стану, уточнено понятійний апарат за напрямом досліджень, визначено порядок і особливості досліджень. Для підвищення оперативності і достовірності досліджень запропоновано використовувати засоби автоматизації. У [3] наведено процедуру ідентифікації ворожих артилерійських засобів ураження, що проводиться поетапно, за результатами якої визначається марка боєприпасу, його зовнішній вигляд і орієнтовно ймовірний район вогневих позицій противника.

Результати аналізу проводяться за певними періодами ведення бойових дій, досліджуються окремі зразки ОВТ рф, елементного складу та властивостей їх складових. При цьому існує низка проблемних питань, які для підвищення ефективності досліджень і вдосконалення системи слід вирішити, а саме:

- потреба уточнення термінів та понять, що використовуються під час досліджень;
- необхідність створення єдиної системи проведення досліджень, впровадження нових засобів автоматизації, які використовуються під час досліджень тощо.

Вирішення зазначених питань дозволить удосконалити систему досліджень, при цьому автоматизація процесів і створення бази знань дозволить підвищити оперативність проведення заходів і достовірність отриманих результатів аналізу уламків.

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій та зростання складності елементної бази озброєння та військової техніки (БпЛА, ракети, засоби зв'язку, навігації, управління тощо), виникає необхідність у системному підході до формалізації знань про ці об'єкти. Одним із найбільш перспективних напрямів є онтологокероване відображення консолідованої інформації, що дозволяє створювати структуровані, взаємопов'язані моделі предметної області, що забезпечують ефективний пошук, аналіз та інтеграцію даних. Такий підхід базується на побудові онтологій – формальних описів понять, їхніх властивостей, взаємозв'язків, умов функціонування, які стають основою для побудови інформаційних систем, здатних до семантичного узгодження даних з різних джерел та їх консолідації. У контексті елементної бази озброєння та військової техніки це дозволяє:

- уніфікувати термінологію та класифікацію об'єктів;
- забезпечити логічну узгодженість між технічними характеристиками, функціональними можливостями та призначенням елементів;

– автоматизувати процеси аналізу, порівняння та вибору технічних засобів для конкретних завдань.

Метою статті є подальший розвиток теорії озброєння за рахунок розроблення методологічних засад досліджень уламків ОВТ в умовах воєнного стану на прикладі ракети ЗМ14, який має бути ефективним інструментом обґрунтування рішень.

Для досягнення мети, що визначена у статті, вирішено низку завдань, а саме: розроблено підхід для автоматизації аналізу елементної бази крилатої ракети ЗМ14, формалізовано завдання досліджень, розроблена онтологокерована архітектура, визначено конфігурацію системи, а також особливості роботи з цифровим агентом при використанні штучного інтелекту для досліджень.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Крилата ракета ЗМ14 ракетного комплексу «Калібр» складається з великої кількості блоків, модулів, кожен з яких виконує ту чи іншу функцію. Модулі, в свою чергу, складаються з субмодулів – таким чином формується складна ієрархія компонентів, на найнижчому рівні якої міститься саме елементна база. При цьому висока складність сучасних ОВТ робить процес аналізу такої елементної бази дуже складним і трудомістким. Для його спрощення найбільш перспективним напрямом є автоматизація – тобто впровадження ефективних сучасних технологій, які дозволятимуть аналізувати інформацію про зразки швидше і ефективніше, а також відображатимуть результат користувачу у зручній формі.

Автоматизацію такої діяльності можна представити у формі:

$$T \rightarrow O \rightarrow N \xrightarrow{i} I_1 \dots I_{n-1} \xrightarrow{i_n} I_n, \quad (1)$$

де: T – масив документів, що описують компонентну базу ОВТ; O – набір інформації про компонентну базу у структурованій формі; N – програмна система, призначена для інтерактивного відображення інформації; i – команда користувача; I – стан програмної системи.

Ефективне впровадження такого підходу можливе тільки у випадку, коли всі його етапи враховують конкретні особливості вхідного набору даних і задач користувача. Їх, в свою чергу, потрібно формалізувати, для чого може бути використане онтологічне моделювання. Результатом такого моделювання буде активна онтологія (2). Підхід передбачає розбиття єдиного функціонального опису на велику кількість фрагментів, кожен з яких описується одним атрибутом з A_F . Це дозволяє значно ефективніше візуалізувати логіку роботи системи автоматизації і суттєво спрощує процес її розробки та підтримки:

$$O = \langle X, R, A_F, A_C, A_A, F_A \rangle, \quad (2)$$

$$A = A_F \cup A_C \cup A_A, \quad (3)$$

де: X – множина об'єктів онтології; R – множина зв'язків між об'єктами онтології; A_F – множина функціональних атрибутів, що містять описи функцій; A_C – множина атрибутів конфігурації, що задають параметри виконання створених на основі A_F функцій; A_A – статичні атрибути, що не приймають участі в виконанні функціональних конфігурацій і містять додаткові пояснення

щодо логіки роботи функціональної конфігурації; F_A – функції, отримані шляхом інтерпретації атрибутів A_F .

Основним обмеженням при цьому є складність роботи з онтологіями – їх створення вимагає залучення висококваліфікованих експертів. При цьому виникає потреба в створенні допоміжних конфігурацій, які могли б редагувати звичайні користувачі. Таким чином формується загальна модель функціональної конфігурації.

$$\Omega = \langle X, R, A, \Lambda(A), \Phi, G \rangle, \quad (4)$$

де: Ω – функціональна конфігурація; X, R, A – об'єкти, зв'язки і атрибути онтологічного компонента конфігурації; Λ – функції, отримані шляхом інтерпретації атрибутів онтології; Φ – допоміжні конфігурації, призначені для редагування користувачем; G – програмні функції, що є складовою програмного модуля, який застосовує конфігурацію.

На практиці доцільно розділяти процес (1) на дві окремих компоненти – обробку і відображення – кожна з яких потребуватиме окремої конфігурації. Найскладнішою є побудова функціональної конфігурації оброблення інформаційних процесів, оскільки на даному етапі повинно бути здійснене виправлення недоліків вхідного масиву даних – і в загальному випадку таких недоліків очікується багато.

Задачу аналізу трофейної техніки рф розглянуто на прикладі ракети ЗМ14 ракетного комплексу «Калібр». Під час досліджень сформована велика кількість різноманітних звітних матеріалів (табл. 1), які в загальному випадку мають недостатньо стандартизовану форму і потребують багатоетапного оброблення.


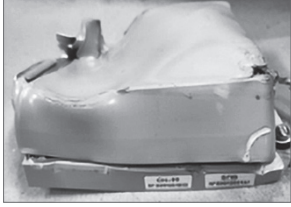

У той же час, запропонована онтологокерована структура (рис. 1) має значну перевагу і вона може бути застосована до великого класу задач щодо оброблення текстових документів [8–10]. Така архітектура формує основні функціональні компоненти загальної системи, однак фактична логіка її роботи описується не програмним кодом цих компонентів, а функціональною конфігурацією онтологічного формату і може бути адаптована до поточних задач користувача.

Конфігурація онтологокерованої системи може створюватись як для обробки окремих типів документів, так і для аналізу всього масиву в цілому – це залежить від конкретних потреб користувача і структури масиву. У деяких випадках окремі компоненти масиву мають достатньо високий рівень уніфікації, що дозволяє звести одні його складові до інших, і в результаті повторно використати значну частину конфігурації. Функціональна конфігурація (рис. 2) визначає один основний вид документу – таблицю даних.

Таблиця даних може містити велику кількість різноманітних параметрів, але всі вони зводяться до чотирьох сутностей:

- модель ОВТ – наприклад, ракетний комплекс «Калібр», а також його складові;
- зразок ОВТ рф – наприклад, ракета ЗМ14;
- компонента – конкретна мікросхема, транзистор або діод тощо, які були знайдені при аналізі трофейної техніки;
- виробник компоненти.

Таблиця 1. Звітні матеріали щодо аналізу елементів крилатої ракети «Калібр» (приклад)

№ з/п	Найменування та тип ОВСТ, опис вузла, агрегату (складової частини), де виявлено комплектуючі виробництва третіх країн (членів НАТО та ЄС), децимальний №, виробник (розробник)	Найменування комплектувального виробу третіх країн або радіоелектронних компонентів	Попередньо визначена країна виробник (найменування компанії виробника)	Відомості про обставини захоплення (отримання)/ знищення зразку ОВТ	Примітка
16.	Крилата ракета типу ЗМ-14 ракетного комплексу «Калібр» 				ЦНДІ ОВТ
16.1	Супутникова навігаційна система СН-99 №Э099201852 Блок приймача супутникових навігаційних сигналів БПВ №Б001202137 	S29AL032D70TAI00 32-мегабітний пристрій флеш-пам'яті 	Саннівейл, Каліфорнія, США (SPANSION)	Ракета типу ЗМ-14 збита у Вінницькій області 21 травня 2022 року засобами ІППО України. Зразок наданий СВР у червні 2022 р.	ЦНДІ ОВТ

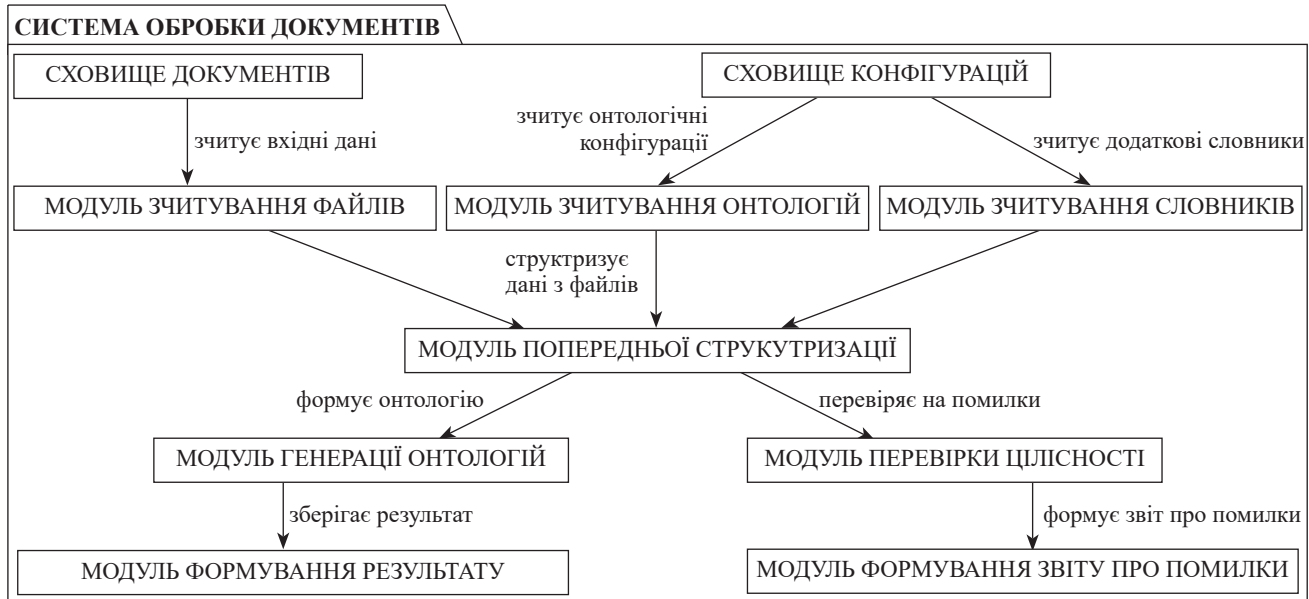


Рис. 1. Типова структура онтологокерованої системи для оброблення великих масивів слабо структурованих документів

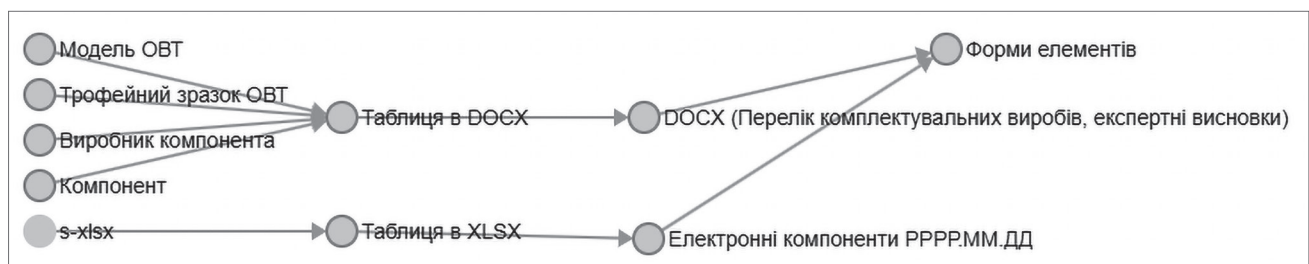


Рис. 2. Конфігурація порядку оброблення звітних матеріалів

Під час аналізу є велика кількість неоднорідностей між структурами різних таблиць, однак онтологокерований підхід дозволяє звести такі неоднорідності до відносно стандартизованого формату. При цьому кінцевою ціллю є створення формату, придатного до обробки системами ШІ.

Стандартизація формату під час оброблення інформації можлива шляхом побудови перетворення виду { Назва в документі → Назва в системі }. Природнім способом представлення для такого перетворення є словник (рис. 3).

Словники, такі, як показано на рисунку, є доповненням до функціональної конфігурації. Вони дозволяють враховувати особливості конкретного масиву даних, що, в свою чергу, дозволяє повторно використовувати онтологічну складову конфігурації для різних таких масивів.

Дані таблиці під час аналізу агрегуються до словника. Так, дані колонок, що відповідають одному полю, об'єднуються в єдине текстове значення, а саме при обробленні прикладу на рис. 3 поля «№ з/п» і «Найменування ОВСТ...» будуть об'єднані в єдиний рядок, що потребуватиме подальшої обробки (рис. 4). Отримане значення повинно пройти ряд перетворень, в результаті яких повинні бути отримані одне або кілька полів заданого формату. Результат перетворення має бути записаний в другий стовпчик словника.

Оскільки більшість значень являють собою фрагменти природномовного тексту, для їх обробки є тільки два

варіанти – обробка вручну або обробка за допомогою сучасних великих мовних моделей (LLM) [10]. Для обробки за допомогою LLM останній потрібно поставити коректну задачу. Сучасні хмарні LLM надають спеціалізовані засоби для цього. Так, при роботі з Microsoft Copilot відповідна функціональність називається «ШІ-агенти» (рис. 6).

Зображений на рисунку ШІ-агент спеціально розроблений для задачі аналізу звітних даних ЦНДІ ОВТ. Він може працювати в ряді режимів, кожен з яких призначений для структуризації конкретного компоненту даних. Так, структуризація назви ОВТ передбачає ідентифікацію в написаній природною мовою фразі конкретних ОВТ та їх структурних блоків, і розташування їх в коректній послідовності (рис. 5).

Робота з таким агентом починається з вказання режиму, в якому він повинен працювати. Після чого агенту можна надавати фрагменти вхідного файлу через буфер обміну, і він повертатиме їх в форматі, придатному до копіювання назад в словник (рис. 6). При цьому необхідно постійно контролювати якість роботи агента – навіть найефективніші сучасні системи ШІ часто роблять помилки, «галюцинують» або просто виявляються нездатні обробити деякі специфічні набори даних.

Також, практика показує, що якість роботи таких систем ШІ дуже швидко падає з ростом об'ємів наданих даних. Оптимальний розмір одного пакету даних –

	А	В	С
1	Заголовок таблиці	Поле	Джерело
2	№ з/п	raw-ame	input/01Перелік комплектувальних виробів книг
3	Найменування та тип ОВСТ, опис вузла, агрегату (складової частини), де	raw-ame	input/01Перелік комплектувальних виробів книг
4	Найменування та тип ОВСТ, опис вузла, агрегату (складової частини), де	raw-ame	input/02Перелік комплектувальних виробів книг
5	Найменування комплектувального виробу третіх країн або радіоелектрон	raw-component	input/01Перелік комплектувальних виробів книг
6	Попередньо визначена країна виробник (найменування компанії виробн	raw-manufacturer	input/01Перелік комплектувальних виробів книг
7	Відомості про обставини захоплення (отримання)/знищення зразку ОВТ	raw-trophy	input/01Перелік комплектувальних виробів книг
8	Примітка	-	input/01Перелік комплектувальних виробів книг
9			
10			
11	маркування на платі	-	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
12	кількість на платі	-	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
13	найменування компонента	raw-component::Найменування	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
14	маркування на компоненті	raw-component::Маркування на компоненті	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
15	службова інформація	-	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
16	Manufacturing Site Code.	-	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
17	партія	raw-component::Партія	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
18	серійний номер	raw-component::Серійний номер	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
19	Дата виготовлення компонента	raw-component::Дата виготовлення	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
20	тип корпусу	raw-component::Тип корпусу	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
21	тип компонента	raw-component::Тип компонента	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
22	тем-ра викор-ння	raw-component::Робоча температура	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
23	Короткий опис	raw-component::Короткий опис	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
24	Країна виробник	-	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
25	Країна бренду	-	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx
26	Батьківщина бренду, Найменування виробника	raw-manufacturer	input/Електронні компоненти 2025.01.18.xlsx

Рис. 3. Скріншот словника нормалізації полів таблиць

	А	Б
1	Опис ОВТ	Структура компонентів ОВТ
2	1.; Крилата ракета типу 9М727 оперативно-тактичного ракетного комплексу «Ісканд	Ракети -> Крилата ракета 9М727 "Іскандер-К" -> ЕОМ «Багет-62-04» -> Блок управління БУ-152
3	1.1.; Процесор 016 №734 оперативно-тактичного ракетного комплексу «Іскандер-К»	Ракети -> Крилата ракета 9М727 "Іскандер-К" -> Процесор 016
4	1.2.; Плата БТ62-406 №816 процесора 016 №734 оперативно-тактичного ракетного к	Ракети -> Крилата ракета 9М727 "Іскандер-К" -> Процесор 016 -> Плата БТ62-406
5	1.3.; Плата БТ62-408 №355 процесора 016 №734 оперативно-тактичного ракетного к	Ракети -> Крилата ракета 9М727 "Іскандер-К" -> Процесор 016 -> Плата БТ62-408
6	1.4.; Оперативно-тактична ракета з касетною бойовою частиною комплексу «Ісканд	Ракети -> Балістична ракета 9М723 "Іскандер" -> Комплекс командних приладів 9Б918
7	2.; Стратегічна авіаційна крилата ракета типу Х-101 №580844502 Супутникова навіга	Ракети -> Крилата ракета Х-101 -> Супутникова навігаційна система СН-99 -> Блок приймача су
8	2.1.; Бортове обладнання супутникової навігації ТДЦК.436647.001-03 Зав.№1601114	Ракети -> Крилата ракета Х-101 -> Бортове обладнання супутникової навігації ТДЦК.436647.001
9	2.2.; Обчислювач ВСС-1-04 стратегічної авіаційної крилатої ракети типу Х-101 №5808	Ракети -> Крилата ракета Х-101 -> Обчислювач ВСС-1-04 -> Блок живлення обчислювача ВСС-1
10	2.3.; Модуль МРК-7 №5320367782 стратегічної авіаційної крилатої ракети типу Х-101	Ракети -> Крилата ракета Х-101 -> Модуль МРК-7
11	2.4.; Модуль МРК-7 №5320166673 стратегічної авіаційної крилатої ракети типу Х-101	Ракети -> Крилата ракета Х-101 -> Модуль МРК-7

Рис. 4. Скріншот словника оброблення значень уламків зброї противника

Р и с . 5. Конфігурація цифрового агента Microsoft Copilot (скріншот інтерфейса)

Р и с . 6. Скріншот інтерфейса фрагмента роботи з цифровим агентом

10–20 рядків словника (в залежності від розміру тексту). Пакети даних більшого розміру мають високий шанс бути обробленими некоректно.

Обробка даних за показаною вище схемою дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю і якістю обробки. Використання виключно систем ШІ (зокрема, через їх API), як правило, дає значно гірші результати, ніж просто відправка в чат агенту. Також, при ручній відправці повідомлень агенту оператор має шанс вчасно помічати типові помилки і давати системі ШІ додаткові інструкції, що дозволяють уникнути їх при обробці наступних пакетів даних. Результатом обробки за описаною вище схемою є інформаційна онтологія (рис. 7). Вона містить ієрархію компонентів ОВТ в структурній формі, а окремі об'єкти онтології містять списки елементів в табличній формі.

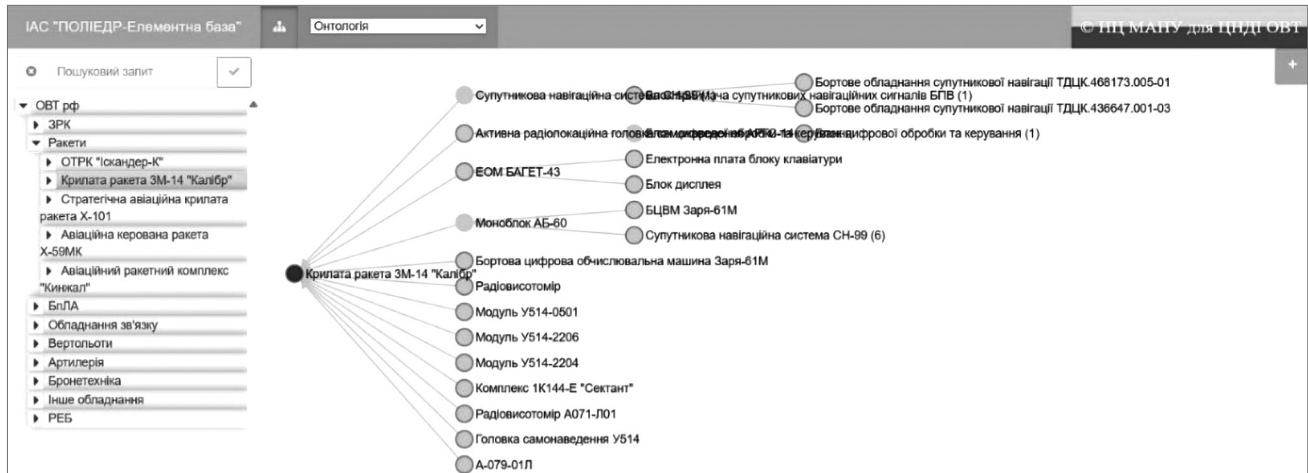
Така онтологія є основою для створення інтерактивної системи відображення компонентної бази. Інтерактивна система, побудована на її основі, дозволяє користувачеві ефективно взаємодіяти з даними про елементну базу кожного конкретного зразка ОВТ, у тому числі КР ЗМ14. Основним елементом інтерфейсу такої системи є табличне представлення компонентів (рис. 8), яке забезпечує зручний доступ до інформації про кожен елемент,

включаючи його назву, тип, технічні характеристики, функціональне призначення.

Користувач має можливість фільтрувати елементи за назвою компонента, типом, функціональною роллю або іншими параметрами. Це дозволяє швидко знаходити потрібні елементи, аналізувати їхні характеристики та порівнювати між собою. Особливо важливою функцією є можливість порівняння елементної бази двох різних зразків трофейної техніки. Такий аналіз дозволяє виявити відмінності у використаних компонентах, оцінити рівень технологічного розвитку, визначити слабкі місця та загальний напрямок модернізації типу ОВТ.

Завдяки онтологічній структурі, система підтримує побудову зв'язків між елементами, що входять до складу різних модулів. Це дає змогу не лише порівнювати окремі компоненти, а й аналізувати їхню роль у загальній архітектурі ОВТ. Наприклад, можна порівняти системи наведення, енергоживлення або зв'язку двох зразків техніки, щоб оцінити їхню ефективність у бойових умовах.

Дані, отримані з системи, можуть бути використані при формуванні звітів про структуру ОВТ, виявленні взаємозамінних елементів, аналізу частоти використання та критичності для функціонування системи. Це



Р и с . 7. Інформаційна онтологія крилатої ракети 3М14 (скріншот інтерфейса)

Зображення компонента	Х-кв компонента	Виробник	Країна виробн
	Мікросхема XC4036XLA HQ208AKP0723 F2368107A, 09I	Xilinx/AMD	США
	Мікросхема CY7C1069DV33 -10ZSXL, 1231 627029, N 04	Spansion	США
	Мікросхема S29GL236P117F102 22988609 B	Cypress	США
	Процесор 79R3031E -40DL, XC0124P	Integrated Device Technology/Renesas Electronics	США
	Кварцовий елемент 00601-236-R 16.000000MHz МНО+23FAD-R M-TRON №103...	M-TRON	США
	Мікросхема XC4036XLA HQ208AKP0723 F2368107A, 09I	Altera/Intel	США
	Ро'єм 940 1226 17050952401	HARTING	ФРН
	Ро'єм 234 0724 02021602301	HARTING	ФРН
	Мікросхема FLEX EPF10K30AQ1240-3N S HCA511213A	Altera/Intel	США
	Мікросхема MB87J2140 0243 Y02		Японія
	Мікросхема ADTL1-12	Mini-Circuits/Scientific Components	США
	Мікросхема TRACO POWER TSM0505S	Traco Electronic	Швейцарія
	Мікросхема AMD L6A0DU90N 11401 BM G NA LAND	Advanced Micro Devices	США
	Мікросхема A6E3 DSP TMS320C6414GLZ C-20 24A10CW	Texas Instruments	США
	Мікросхема MIC 49300WR 1004PHIL	Microchip Technology/Atmel	США
	Мікросхема ALVC 164215 A3X3 - 04 11270	Integrated Device Technology, Texas Instruments, Renesas Electronics Corporation, ...	США, Японі
	Мікросхема 99 AMD 1640DU90N1 943BBC32	AMD	Тайланд, США
	Мікросхема 01CZD2K LV273Л, 04	Texas Instruments	США
	Мікросхема ALTERA Cyclone EP1C3T14417N L HCE951049A	Altera/Intel	США компан
	Мікросхема 10-35L X5 2	Vishay	США
	Мікросхема DSP TMS 320C30GEL JG-2252LGB 1988	Texas Instruments	США
	Мікросхема CY7C1069... 103791 1127 04 614608	Cypress Semiconductor/Infobase Technology	США

Р и с . 8. Таблиця елементної бази елементів крилатих ракет (скріншот інтерфейса)

особливо корисно при плануванні санкційних заходів, а також заходів щодо блокування незаконного імпорту в країну-агресора в обхід санкцій. Наприклад, якщо певний елемент зустрічається у багатьох зразках техніки, блокування його поставки має бути пріоритетним. Інтерактивна система також підтримує режим візуалізації в онтологічній формі, що дозволяє краще зрозуміти їхню ієрархію компонентів ОВТ та взаємозв'язки. Користувач може перемикатися між табличним і графічним режимами, залежно від завдань, які він виконує.

Перспективним напрямом розвитку системи є інтеграція з базами даних підприємств та митними базами. Це дозволить автоматично знаходити високоризиковані транзакції, що можуть використовуватись для обходу санкцій, за наявності даних – навіть в реальному часі. Таким чином, онтологія перетворюється з інструменту аналізу на основу для прийняття рішень.

Окрім аналізу ракети 3М14, інтерактивна система може бути ефективно використана для роботи з іншими зразками ОВТ. Завдяки онтологічній структурі, вона дозволяє формувати повну картину компонентної бази

вітчизняних систем, виявляти дублікати, критичні вузли та потенційні точки для модернізації. Це особливо важливо в умовах обмежених ресурсів, коли необхідно приймати обґрунтовані рішення щодо пріоритетів технічного оновлення.

Система може бути інтегрована з внутрішніми базами даних підприємств оборонного комплексу, що дозволить автоматично оновлювати інформацію про наявні запаси, виробничі потужності, терміни виготовлення та логістичні обмеження. Таким чином, вона може слугувати інструментом для контролю запасів, планування виробництва та оптимізації постачання. Система також може бути використана для технічного аудиту – перевірки відповідності фактичної конфігурації ОВТ нормативним вимогам, стандартам та технічним умовам. Це особливо актуально при прийманні техніки на озброєння, проведенні випробувань або підготовці до серійного виробництва.

ВИСНОВОК

Таким чином, інтелектуальна інформаційна платформа аналізу елементів уламків крилатої ракети 3М14,

побудована на основі онтології, є універсальним інструментом, який може бути адаптований для широкого кола завдань – від аналізу зброї противника до управління життєвим циклом перспективних зразків ОВТ. Система є малою мовною моделлю, побудована на трансдисциплінарних засадах, забезпечує адаптивну обробку даних, що може використовуватись для підтримки прийняття рішень, контролю за запасами, аналізу зброї противника та інтеграції з різними інформаційними базами знань.

У подальшому буде розглянуто консолідоване використання інформаційних процесів як основи для побудови мережових знання-орієнтованих систем, здатних до масштабування, самонавчання та інтеграції з національними платформами різного призначення.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Інформаційний вибух. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Інформаційний_вибух (дата звернення: 26.09.2023).
2. Науково-методичний апарат дослідження трофейних зразків та уламків озброєння та військової техніки російської федерації / Чепков І.Б., Стрижак О.Є., Сотник В.В., Потапов Г.М. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2022. Вип. 1 (33). С. 12—21. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).12-21](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).12-21).
3. Процедура ідентифікації артилерійських засобів ураження / Кубашко І.Б., Кузьменко В.О., Третяк Н.М., Яриш І.Ю. Зб. наук. пр. Черкаси: ДНДІ ВС ОВТ. 2022. № 3 (21). С. 50—56.
4. Lyman, P. & Varian, H.R. How much information. Available at: https://chnm.gmu.edu/digitalhistory/links/pdf/preserving/8_5a.pdf (accessed: 26.09.2023).
5. Rivera, A.C., Tapia-Leon, M. & Lujan-Mora, S. (2018). Recommendation Systems in Education: A Systematic Mapping Study. Cham : Springer. Pp. 937—947. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_89.
6. Ansari, M.H., Moradi, M., NikRah, O. & Kambakhsh, K.M. (2016). CodERS: A hybrid recommender system for an E-learning system. 2nd Intern. Conf. of Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS). IEEE. Pp. 1—5. <https://doi.org/10.1109/ICSPIS.2016.7869884>.
7. Chungora, N., Young, R., Gunendran, G., Palner, C. & Usman, Z. (2013). A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. Computers in industry. № 64 (4). Pp. 392—401.
8. Інформаційно-навчальні ресурси. Капсули знань : колективна монографія за ред. С. О. Довгого, О. Є. Стрижака. Київ : Інст. обдарованої дитини НАПН України. 2019. 215 с.
9. Трансдисциплінарне представлення інформації за допомогою інтерактивних документів / Мінцер О. П., Стрижак О.Є., Приходнюк В. В., Шевцова О. М. Медична інформатика та інженерія. 2018. № 1. С. 47—52.
10. Авторське свідоцтво на твір. Комп'ютерна програма «Трансдисциплінарні онтологічні дослідження операціональних середовищ і процесів» (ТОДОС-ПРОЦЕСИ). № 96130. 18.02.2020.
11. Левченко Д. Тенденції розвитку штучного інтелекту в Україні та світі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gwaramedia.com/tendenczii-rozvitku-shtuchnogo-intelektu-v-ukraini-ta-sviti> (дата звернення: 29.09.2023).

REFERENCES

1. “Informatsiynyy vybukh” [Information explosion]. Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Informatsiynyy_vybukh (accessed: 26.09.2023).
2. Chepkov, I.B., Stryzhak, O.E., Sotnyk, V.V. & Potapov, G.M. (2022). “Naukovo-metodychnyi aparat doslidzhennia trofeinykh zrazkiv ta ulamkiv ozbroiennia ta viyskovoї tekhniki rosiiskoyi federatsii” [Scientific and methodological apparatus for the study of captured samples and fragments of weapons and military equipment of the russian federation]. Weapons and military equipment. K.: Iss. 1 (33). Pp. 12—21. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1\(33\).12-21](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.1(33).12-21).
3. Kubashko, I.B., Kuzmenko, V.O., Tretyak, N.M. & Yarysh, I.Yu. (2022). “Protsedura identyfikatsii artyleriiskyykh zasobiv urazhennia” [Procedure for identification of artillery weapons]. Coll. of scientific works. Cherkasy: DNII VS OVT. No. 3 (21). P. 50—56.
4. Lyman, P. & Varian, H.R. How much information. Available at: https://chnm.gmu.edu/digitalhistory/links/pdf/preserving/8_5a.pdf (accessed: 26.09.2023).
5. Rivera, A.C., Tapia-Leon, M. & Lujan-Mora, S. (2018). Recommendation Systems in Education: A Systematic Mapping Study. Cham : Springer. Pp. 937—947. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_89.
6. Ansari, M.H., Moradi, M., NikRah, O. & Kambakhsh, K.M. (2016). CodERS: A hybrid recommender system for an E-learning system. 2nd Intern. Conf. of Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS). IEEE. Pp. 1—5. <https://doi.org/10.1109/ICSPIS.2016.7869884>.
7. Chungora, N., Young, R., Gunendran, G., Palner, C. & Usman, Z. (2013). A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. Computers in industry. № 64 (4). Pp. 392—401.
8. “Informatsiyno-navchalni resursy. Kapsuly znan” [Informational and educational resources. Capsules of knowledge]. Kolektyvna monohrafiia za red. S. O. Dovhoho, O. Ye. Stryzhaka. K. : Inst. obdarovanoi dytyny NAPN Ukrainy. 2019. 215 p.
9. Mintser, O.P., Stryzhak, O.Ye., Prykhodnyuk, V.V. & Shevtsova, O.M. (2018). “Transdystyplinarne predstavleniia informatsii za dopomohoiu interaktyvnykh dokumentiv” [Transdisciplinary presentation of information using interactive documents]. Medychna informatyka ta inzheneriia. № 1. Pp. 47—52.
10. “Avtorske svidotstvo na tvir. Kompiuterna prohrama” «Transdystyplinarni ontolohichni doslidzhennia operatsionalnykh seredovyshch i protsesiv» [Author's certificate for the work. Computer program «Transdisciplinary ontological research of operational environments and processes»]. (TODOS-PROCESSES). No. 96130. 02/18/2020.
11. Levchenko, D. “Tendentsii rozvytku shtuchnogo intelektu v Ukraini ta sviti” [Trends in the development of artificial intelligence in Ukraine and the world]. Available at: <https://gwaramedia.com/tendenczii-rozvitku-shtuchnogo-intelektu-v-ukraini-ta-sviti> (accessed: 29.09.2023).

**Stryzhak O.Ye., Potapov H.M., Sen M.P.,
Kocharian O.O., Prykhodniuk V.V.**

**INTELLIGENT INFORMATION PLATFORM FOR
ANALYZING ELEMENTS OF FRAGMENTS OF
THE 3M14 CRUISE MISSILE OF THE MISSILE
COMPLEX**

The article defines the importance and relevance of the problems that arise during the study of fragments of enemy weapons and military equipment under martial law. The scientific nature of the study of the elements of the fragments of the 3M14 cruise missile of the Caliber missile complex is substantiated, the procedure and features of the studies are determined. The study of the elements of the 3M14 cruise missile fragments is proposed to be carried out using the mathematical apparatus and the capabilities of an intellectual information platform. The basis for building such a platform is the cognitive information technology KIT Polyhedron. The use of this technology allows you to form, based on the consolidation of information, a set of interactive documents that are received in the format of system-integrated various types of information resources during the study of the fragments of the 3M14 cruise missile of the Caliber missile complex and the narratives of which are endowed with the features of reliability, completeness, integrity and partial consistency.

Keywords: *research of the element base, intelligent information platform, small language model, ontology, cruise missile, structuring of information process arrays, taxonomy.*

Відомості про авторів:

Стрижак Олександр Євгенійович

доктор технічних наук, професор
головний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2481-2877>
e-mail: sae953@gmail.com

Потапов Григорій Михайлович

кандидат військових наук
старший науковий співробітник
науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5778-9327>
e-mail: pgm201602@gmail.com

Сень Микола Петрович

кандидат політичних наук, докторант
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки
Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6964-622X>
e-mail: slavon07@gmail.com

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/0000-0002-3164-0129>
e-mail: andkochoks567@gmail.com

Приходнюк Віталій Валерійович

кандидат технічних наук
начальник наукового відділу
Національний центр «Мала академія наук України»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2108-7091>
e-mail: tangens91@gmail.com

Information about the authors:

Stryzhak Oleksandr

Doctor of Technical Sciences, Professor
Lead Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2481-2877>
e-mail: sae953@gmail.com

Potapov Hrihorii

Candidate of Military Sciences
Senior Researcher, Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0000002-5778-9327>
e-mail: pgm201602@gmail.com

Sen Mykola

Candidate of Political Sciences, Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6964-622X>
e-mail: slavon07@gmail.com

Kocharian Oksana

Candidate of Technical Sciences
Senior Research Associate
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

Prykhodniuk Vitalii

Candidate of Technical Sciences
Senior Research Associate
Head of the Department of the National Center
«Small Academy of Sciences of Ukraine»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2108-7091>
e-mail: tangens91@gmail.com

Стаття надійшла до редколегії 26.12.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 005:623

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).65-75](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).65-75)

В. І. СЛЮСАР, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
 (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України, м. Київ)

МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ВИПРОБУВАНЬ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

У статті запропоновано мультиагентну систему підтримки випробувань ОВТ, яка складається з низки спеціалізованих інтелектуальних агентів. Така система дозволяє перевести випробування з повільного послідовного режиму у швидкий ітеративний цикл із автоматизованою генерацією сценаріїв, безперервним збором і аналізом даних, напівавтоматичною звітністю й контрольованою логістикою. В результаті можуть бути створені передумови для скорочення строків впровадження нових зразків ОВТ без компромісів щодо безпеки, відтворюваності та відповідності нормативним вимогам.

Ключові слова: штучний інтелект, мультиагентні системи, великі мовні моделі.

ВСТУП

Зростання обсягів та складності завдань з випробувань озброєння та військової техніки (ОВТ) в умовах обмежених ресурсів призводить до необхідності удосконалення відповідної методології з метою мінімізації витрат та запобігання зниженню якості результатів процесного менеджменту.

Відповідні зусилля завжди були в фокусі діяльності усіх ланок системи розробки ОВТ, особливо задіяних в ній науково-дослідних установ. Головний тренд при цьому полягає в переході до застосування технологій штучного інтелекту, розвиток яких породжує кардинальні трансформації в усіх сферах суспільства [1–4]. Зокрема, згідно з [5] кращі великі мовні моделі (LLM) вже наближаються за якістю виконання робіт до рівнів галузевих експертів. Автори [5] відзначили, що модель Claude Opus 4.1 зайняла перше місце за кількістю переваг або нічиїх у 47,6 % тестів порівняно з роботою, виконаною людиною. За цією LLM слідує GPT-5-high з 38,8 % і o3 high з 34,1 %. Відповідні дані отримані за допомогою розробленого компанією OpenAI бенчмарку GDPval для 1230 реальних задач економіки, сформованих безпосередньо з досвіду кращих фахівців широкого спектра професій і секторів, на долю яких припадає найбільший внесок у ВВП США. Кожне завдання GDPval спиралося на конкретні результати діяльності, наприклад, юридичний сервіс, інженерний проект, бесіду зі службою технічної підтримки. Завдання були ретельно

відпрацьовані та перевірені досвідченими експертами з середнім стажем роботи у відповідній сфері 14 років. При цьому з'ясувалося, що ШІ здатен виконувати роботу в 44 професіях з 9 галузей економіки приблизно у 100 разів швидше і в 100 разів дешевше ніж людина.

В контексті сучасних тенденцій до автоматизації, цифровізації та скорочення життєвого циклу розробок і впровадження нових зразків ОВТ ідея мультиагентної системи підтримки випробувань озброєння та військової техніки є своєчасною, перспективною. В основі пропозиції лежить концепція розподіленого функціонального навантаження між спеціалізованими інтелектуальними агентами [6–8], кожен з яких виконує чітко окреслений сегмент роботи, дозволяючи таким чином досягати високої ефективності, швидкості реагування та адаптивності до змін у випробувальному процесі. Відповідна ідея була вперше офіційно представлена автором у вересні 2025 року на XXV науково-технічній конференції «Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки», що проводилася ДНДІ випробувань і сертифікації ОВТ [9].

Метою статті є обґрунтування складу агентів мультиагентної системи підтримки випробувань озброєння та військової техніки та визначення їх функцій і взаємодії.

РЕЗУЛЬТАТИ

В мінімальному варіанті реалізації запропонована мультиагентна система має налічувати 7 агентів, пов'язаних у єдину структуру, представлену на рис. 1. Розглянемо детально завдання кожного з цих агентів з урахуванням різних аспектів їх функціонування та особливостей практичної реалізації.

Агент аналізу технічної документації в наведеній на рис. 1 структурі виконує первинну експертизу матеріалів, що надходять на випробування, включаючи технічні специфікації, креслення, моделі, сертифікати, програми випробувань, історію модернізацій, протоколи попередніх тестів тощо. Цей агент повинен бути оснащений засобами розпізнавання структурованих і неструктурованих даних, модулем семантичного аналізу, механізмом витягу сутностей і побудови логіко-функціональних моделей виробу ОВТ. Наприклад, він має автоматично формувати ієрархію вузлів і підсистем техніки, виявляти ключові параметри, обмеження, допуски та взаємозв'язки, що критично важливо для наступних етапів планування випробувань. У разі розширення функціоналу цей агент може також формувати запити до виробника або



Р и с . 1. Структура мультиагентної системи підтримки випробувань ОВТ

розробника у випадках виявлення неузгодженостей чи нестачі інформації.

Агент формалізації результатів випробувань відповідає за реєстрацію, структурування та попередню аналітичну обробку даних, які надходять з об'єктивних засобів контролю – відео- і тепловізійних камер, сенсорних платформ, телеметрії, журналів роботи автономних систем, а також із суб'єктивних джерел (протоколи випробувачів). Цей агент повинен забезпечити автоматичне заповнення протоколів згідно з нормативною базою, порівняння результатів із заданими критеріями успішності, виявлення аномалій, узагальнення статистичних закономірностей. За потреби він може генерувати візуальні звіти, графіки, діаграми та здійснювати порівняльний аналіз із попередніми версіями або конкурентними зразками. Такий підхід значно знижує ймовірність людської помилки, усуває рутину та прискорює подальші рішення щодо оцінки придатності.

Агент генерації тактичних сценаріїв випробувань є ключовою інноваційною ланкою системи. Його завдання – створення реалістичних, змістовно обґрунтованих і варіативних сценаріїв застосування техніки у бойових умовах, які мають бути відтворені під час випробувань. Агент використовує знання про поточні та перспективні театри воєнних дій, топографію, моделі поведінки противника, логіку бойових завдань. На основі цього він формує послідовності дій, навантажень і загроз, які повинна витримати техніка, враховуючи її призначення. Наприклад, для безпілотного комплексу сценарій може включати обхід засобів РЕБ, імпровізовані перешкоди, автономну навігацію в умовах відсутності зв'язку тощо. Це забезпечує перевірку не лише технічних, а й тактичних характеристик виробу, наближених до реального бойового застосування.

З досвіду участі у багатьох випробуваннях ОВТ слід зазначити, що логістичне забезпечення є їх ахілесовою п'ятою. Продуманість логістики, її збалансованість та безперервність слід розглядати в якості ключових умов успішної реалізації визначених завдань членами комісії з випробувань, а також стабільного функціонування зразка ОВТ та тестового обладнання. Агент з логістичної підтримки відповідає за планування, забезпечення та моніторинг матеріально-технічних ресурсів, необхідних для підготовки і проведення випробувань ОВТ. Він координує надходження комплектуючих, інструментів, палива, запасних частин, вимірювальної апаратури і технічного персоналу, забезпечує своєчасне розміщення обладнання на полігоні або в лабораторії та контролює повернення і збереження матеріалів після тестів.

Вхідними даними для логістичного агента є заявки на ресурси від інших агентів і користувачів, дані про наявні запаси і терміни поставки, телеметрія від транспортних засобів, розклад випробувань і обмеження середовища. Вихідними продуктами є плани постачання і розміщення, маршрути транспортування, журнали руху матеріалів, повідомлення про відхилення від плану і пропозиції щодо пріоритизації ресурсів. Агент також генерує метадані для звітів і структурує записи для автоматичного занесення в протоколи випробувань. Він реалізує прогнозування попиту на основі історії витрат і поточних

планів випробувань, алгоритми оптимізації розміщення і маршрутизації з урахуванням дорожніх обмежень і погодних умов, механізми динамічного перерозподілу ресурсів у випадку форс-мажору, а також верифікацію і контроль прийому-видачі матеріалів. У випадку пошкодження обладнання агент ініціює процедуру заміни і пропонує альтернативи з найменшою затримкою для продовження випробувань, резервує техніку і персонал.

Звісно, при такому різноманітті завдань логістичний агент може, в свою чергу, являти собою підсистему спеціалізованих агентів-модулів, кожен з яких виконує окремі набір функцій. Відповідна ієрархічна архітектура представлена на рис. 2. На додаток до агентів-модулів, вона містить головного агента-маршрутизатора, який визначає конкретний сегмент архітектури, що повинен послідовно обробляти запит. Крім того, в ній передбачено агентів-маршрутизаторів нижчого рівня, що обирають агентів-модулів, з числа наявних в активованому сегменті. Така архітектура може бути використана і для інших агентів з числа наведених на рис. 1. В задачах логістики її перевагою є можливість горизонтального масштабування при збільшенні числа випробувальних майданчиків або обсягів матеріалів. Логіку пріоритизації і правила розподілу ресурсів слід робити адаптивними під різні типи випробувань і підходи замовників. Для покращення адаптивності корисно передбачити агент-модулі навчання на виробничих даних, які коригуватимуть прогнози і рекомендації з часом.

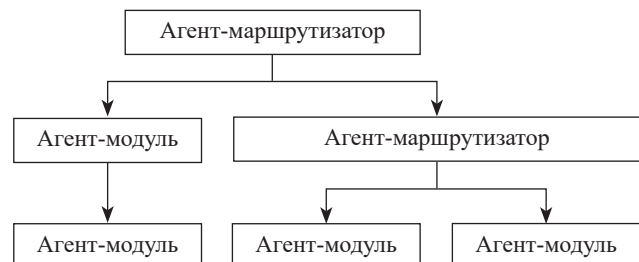


Рис. 2. Приклад ієрархічної архітектури окремих агентів, представлених на рис. 1

При вирішенні логістичних завдань прогнозування і оптимізації можуть застосовуватися нейромережеві методи обробки часових рядів для оцінки потреб, евристичні алгоритми або лінійне програмування – для розв'язання задач маршрутизації і розподілу запасів, а також прості правила пріоритизації – для критичних елементів.

В якості фізичних інтерфейсів рекомендується використовувати стандартизовані API (наприклад REST або gRPC) з чіткою схемою повідомлень для заявок, підтверджень і звітів. На цій основі агент може підключатися до внутрішніх баз даних запасів, систем ERP або простих таблиць інвентаризації і може інформувати зовнішні служби постачання про замовлення. Також можуть бути задіяні спеціалізовані протоколи міжагентського обміну даними [10–14], потреба в яких була обґрунтована автором в [6]. У разі обмеженого зв'язку агент здатен працювати у режимі часткової автономії з локальною чергою завдань і синхронізацією після відновлення каналу зв'язку. При цьому агент з логістики повинен

забезпечувати цілісність даних про запаси і маршрути, автентифікацію запитів і шифрування критичних повідомлень, особливо коли мова йде про координати полігону або маршрути транспортування. Рекомендовано дотримуватися принципів мінімальних привілеїв і документувати всі дії для можливості подальшого проведення аудиту. У критичних сценаріях агент має підтримувати резервні процедури для ручного управління запасами і передачі найважливіших команд через альтернативні канали зв'язку.

Для оцінки якості функціонування логістичного агента доцільно використовувати такі метрики як точність прогнозу попиту, частка своєчасних поставок, середній час реагування на заявку, коефіцієнт використання запасів і кількість інцидентів логістичного характеру на 100 операцій. Також важливими є якість даних у системі інвентаризації і швидкість відновлення працездатності після відмови.

На етапі впровадження агента з логістики рекомендується починати з обмеженого сценарію з залученням однієї або двох локацій, інтегрувавши агента з вже існуючими реєстраційними системами і відпрацювавши сценарії критичних відмов. Тестування працездатності агента має включати ситуації з втратами зв'язку, відмовами постачальників і різкими змінами плану випробувань, щоб перевірити стійкість процедур і коректність алгоритмів перерозподілу ресурсів.

Таким чином, агент з логістичної підтримки є практичною і необхідною складовою мультиагентної системи випробувань, яка істотно підвищує оперативність, передбачуваність і надійність процесу, знижуючи трудовитрати та ризики, пов'язані з матеріально-технічним забезпеченням.

Крім зазначених агентів, до запропонованої архітектури мультиагентної системи доцільно додати також ще три критично важливі компоненти – агента-оркестратора, агента-інтерфейсу з користувачами та агента з кіберзахисту. Їхнє включення не лише підвищує функціональну завершеність системи, а й забезпечує стабільну, безпечну та ефективну взаємодію між усіма учасниками процесу випробувань, як людськими, так і програмними.

Агент-оркестратор є центральною координуючою ланкою мультиагентної системи, що відповідає за управління взаємодією між іншими агентами, розподіл завдань, моніторинг станів і підтримку узгодженого виконання сценаріїв. Його функціональність ґрунтується на принципах оркестрації в розподілених обчислювальних середовищах і базується на онтологічному поданні завдань, чергах повідомлень, механізмах пріоритизації, розкладу та реактивного планування. Агент-оркестратор реагує на зміни контексту. Наприклад, у разі невідомого завантаження технічної документації чи збою у прийомі телеметрії він автоматично перенаправляє потоки даних, активує резервні маршрути або викликає агента відновлення. Тісна взаємодія агента-оркестратора з логістичним агентом синхронізує логістичні події з планом випробувань. Таким чином, забезпечується стійкість системи до відмов і можливість її безперервної роботи в режимі, наближеному до реального часу.

Агент інтерфейсу з користувачами виконує роль інтелектуального посередника між людськими операторами (випробувачами, інженерами, аудитором, військовими замовниками) та системою. Його завдання – забезпечити багатомодальну, інтуїтивно зрозумілу й адаптивну взаємодію з урахуванням ролей, прав доступу та поточних завдань користувача. Агент повинен підтримувати як текстовий, так і графічний інтерфейс, мати можливість генерації мовних звітів, надання рекомендацій, пояснення результатів випробувань у зрозумілій формі, а також ведення протоколу дій. Особливу цінність матиме інтеграція цього агента з системами розпізнавання мови, жестів, біометричної автентифікації, що дозволяє забезпечити безпечну та зручну експлуатацію системи в умовах мобільних командних пунктів, польових випробувань або бойових ситуацій.

Агент з кіберзахисту виконує функцію постійного моніторингу безпеки мультиагентної системи, виявлення і нейтралізації потенційних кіберзагроз, перевірки цілісності даних, захисту каналів комунікації та керування криптографічними ключами. У разі виявлення аномальної активності (наприклад, несанкціонованого запиту до результатів випробувань, змін конфігураційного файлу, зовнішнього підключення з невідомого вузла) цей агент здатен ініціювати ізоляцію окремих компонентів, блокування доступу, запуск процедури документування подій і генерацію автоматизованого звіту про інцидент. Агент повинен підтримувати сучасні протоколи безпеки, відповідати принципам Zero Trust Architecture, а також взаємодіяти з зовнішніми системами кіберрозвідки для отримання актуальних індикаторів компрометації. Його наявність критично важлива в умовах гібридної війни, коли випробувальна інфраструктура може бути цілком кібератак зі сторони противника або підрядних структур.

Узгоджена робота оркестратора, інтерфейсного агента та агента кіберзахисту забезпечує не лише технологічну завершеність системи, а й її придатність до практичного використання в умовах бойової готовності, гетерогенних середовищ (наприклад, змішаних мереж з елементами військової та цивільної інфраструктури), а також дає змогу масштабувати систему до національного рівня випробувальної мережі.

Синергетичне поєднання усіх зазначених агентів дозволяє реалізувати замкнений цикл експертизи, планування, проведення та аналізу випробувань, який може бути швидко адаптований до нових зразків ОВТ, що надходять на випробування, навіть у межах коротких строків міжетапних оцінок. Такий підхід особливо важливий у період активної фази розробки, коли оновлення можуть відбуватись щотижня або навіть щоденно. У рамках воєнного стану або прискорених програм переозброєння це дає суттєвий вигоду в часі, дозволяючи перейти від традиційних багатомісячних випробувань до циклів тривалістю в кілька тижнів або навіть днів із не меншою валідністю результатів.

Пропонована мультиагентна система може бути легко масштабована шляхом додавання інших агентів. Зокрема, це може бути агент-моделювальник для симуляції віртуального середовища випробувань, агент ризик-менеджменту для оцінки потенційних техноген-

них загроз, агент з метрологічного забезпечення, агент нормативного аудиту для перевірки відповідності до стандартів НАТО, ISO та ін.

Загалом, запропонована система відповідає критеріям концепцій цифрового інжинірингу, підходів Model-Based Systems Engineering (MBSE) та оперативної сумісності. Вона створює передумови для переходу від лінійного до ітеративного циклу випробувань, у якому результати кожного етапу одразу впливають на планування наступного з них, зменшуючи інерційність системи та посилюючи контроль якості.

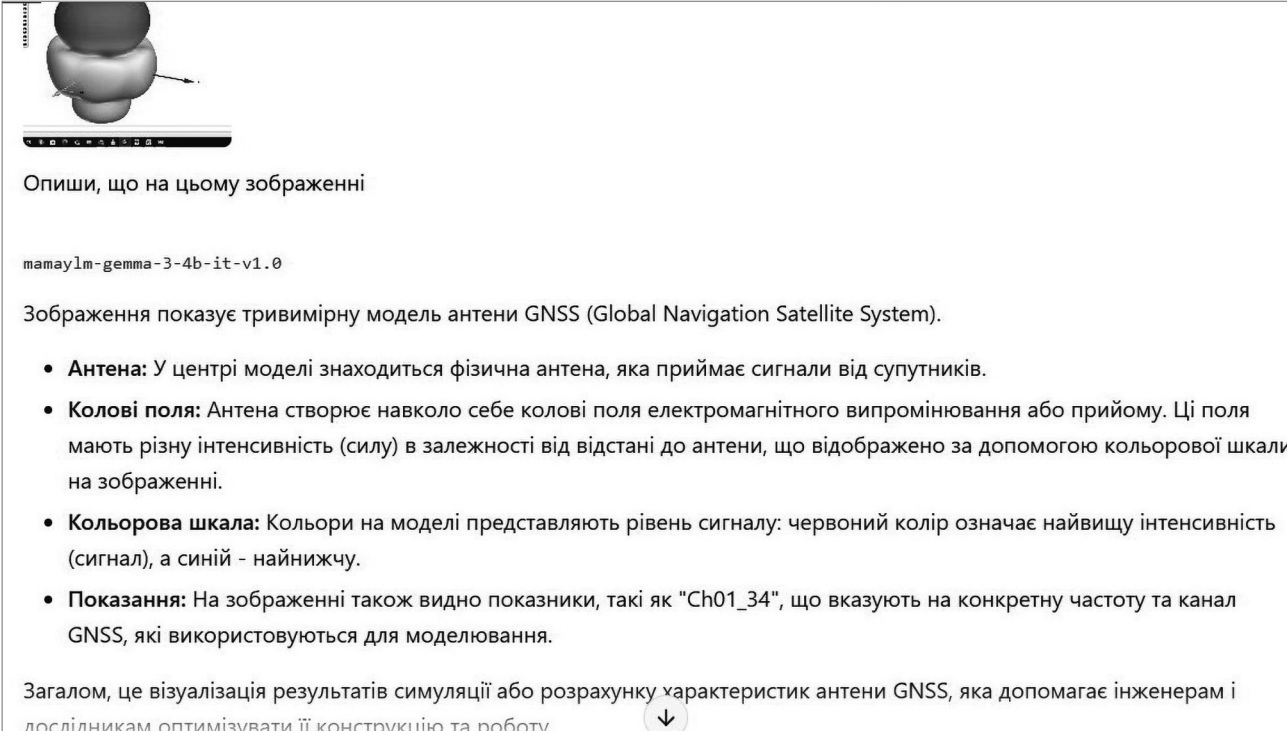
Інтеграція зазначених агентів створює передумови для реалізації повного циклу «Machine-in-the-Loop» у випробуваннях із забезпеченням постійного автоматизованого аналізу, адаптації, перевірки та валідації. Це відповідає новітнім доктринам військово-технічного інжинірингу в умовах динамічного конфлікту. Така мультиагентна система випробувань не лише автоматизує процедури, а й суттєво змінює логіку взаємодії суб'єктів випробувального процесу – від інженерів, що готують техніку, до аналітиків, що ухвалюють рішення про прийнятність виробу до використання. У своїй основі вона є інструментом підвищення темпів інновацій і забезпечення оборонної спроможності шляхом швидкої інтеграції нових технологій у збройні сили.

В основі практичної реалізації запропонованого підходу лежить застосування локальних мовних моделей у різних варіантах, детально розглянутих в [15, 16], а також нових розробок у цій сфері та технології Retrieval Augmented Generation (RAG) [17] для поєднання агентів з базами даних.

В якості можливих кандидатів на роль локальних LLM станом на момент написання статті слід вказати лінійку україномовних моделей MamaLM-Gemma-3-12B [18]

та MamaLM-Gemma-3-4B [19], розроблених Інститутом комп'ютерних наук, штучного інтелекту і технологій (INSAIT, Болгарія) у версіях не тільки для роботи з інструкціями, а й обробки зображень. Ці LLM стали першими україномовними мультимодальними моделями, які до того ж доволі добре орієнтуються в технічному контексті. Для прикладу на рис. 3 приведено результат опису зображення тривимірної діаграми спрямованості антени за допомогою 4-бітної версії LLM MamaLM-Gemma-3-4B-IT-v1.0. Аналогічні мультимодальні результати дає застосування україномовної моделі Lora (lora-v0.1.2-instruct), яка так само базується на Gemma-3-12B [20]. Однак, одним з недоліків родини MamaLM-Gemma-3 та Lora є недостатня підтримка математичних формул, оперування якими вважається невід'ємною частиною аналізу технічної документації та обробки результатів випробувань. Цього недоліка позбавлені моделі gpt-oss-20b та gpt-oss-120b від компанії Open AI [9, 21], які теж добре підтримують україномовний контент, хоча й не є мультимодальними. На рис. 4 представлено фрагмент сумаризації наукової статті, зробленої LLM gpt-oss-120b з відтворенням формул у форматі LaTeX.

Звісно, моделі gpt-oss-20b і gpt-oss-120b є більш вибагливими до ресурсів порівняно з LLM серії MamaLM-Gemma-3 та Lora. Однак, проведені автором дослідження свідчать про можливість їх застосування навіть на доволі типовому ноутбучі з відеокартою (GPU) NVIDIA RTX 3080, що має 16 ГБ відеопам'яті (VRAM) і 32 ГБ оперативної пам'яті. Цьому сприяє багатопарова архітектура LLM, яка дозволяє розподіляти фрагменти моделі між VRAM та вінчестером залежно від розмірів контекстного вікна, розрядності KV-кешу коефіцієнтів уваги та кількості одночасних конвеєрів (B), що підтримують окремий KV-кеш під час інференсу. На рис. 5, 6



Опиши, що на цьому зображенні

mamaim-gemma-3-4b-it-v1.0

Зображення показує тривимірну модель антени GNSS (Global Navigation Satellite System).

- **Антенa:** У центрі моделі знаходиться фізична антенa, яка приймає сигнали від супутників.
- **Колові поля:** Антенa створює навколо себе колові поля електромагнітного випромінювання або прийому. Ці поля мають різну інтенсивність (силу) в залежності від відстані до антени, що відображено за допомогою кольорової шкали на зображенні.
- **Кольорова шкала:** Кольори на моделі представляють рівень сигналу: червоний колір означає найвищу інтенсивність (сигнал), а синій - найнижчу.
- **Показання:** На зображенні також видно показники, такі як "Ch01_34", що вказують на конкретну частоту та канал GNSS, які використовуються для моделювання.

Загалом, це візуалізація результатів симуляції або розрахунку характеристик антени GNSS, яка допомагає інженерам і дослідникам оптимізувати її конструкцію та роботу.

Р и с . 3. Результат використання моделі MamaLM-Gemma-3-4B-IT-v1.0 для опису зображення

Основні ідеї, викладені у статті	
Ключовий аспект	Що розглядається
Динаміка відкритих систем	Описуються за рівнянням Лінблада: $\frac{d\rho_t}{dt} = -i[H, \rho_t] + \mathcal{D}(\rho_t)$
Перетворення у векторний простір	Через векторизацію $\rho_t \rightarrow \vec{\rho}_t \in \mathbb{C}^{d^2}$ отримуємо лінійну систему $\dot{\vec{\rho}}_t = -L\vec{\rho}_t$.
Embedding-compression	Потрібна ортонормована базис-матриця $V \in \mathbb{C}^{d^2 \times r}$ (зменшена розмірність $r \ll d^2$). Вона дозволяє апроксимувати: $\vec{\rho}_t \approx V e^{-V^\dagger L V t} V^\dagger \vec{\rho}_0.$
Використання ядра	Збираємо емпіричну матрицю спостережень X (усі траєкторії), будуємо ядро $K = (X^\dagger X)^+$. Потім за допомогою Nystrom-методу + SVD отримуємо зменшену базис-матрицю V .
Оцінка похибки	Покладена верхня межа на помилку: $\ \vec{\rho}_t - \vec{\tilde{\rho}}_t\ \leq \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{\ K - \tilde{K}\ _*}{t}.$ У практиці використовують RMSE та інтегральну похибку.

Рис. 4. Відтворення формул LLM gpt-oss-120b

наведені вимоги для розміру VRAM, який необхідний для повного розміщення gpt-oss-20b та gpt-oss-120b у VRAM при B=1 та B=4, 4- та 8-бітних коефіцієнтах KV-кешу і різних за кількістю токенів контекстних вікнах (4K, 8K, 16K, 32K, 64K та 128K). Дослідження проводилися за допомогою локального середовища для інференсу LLM з відкритим кодом Ollama [15, 16], яке забезпечило запуск і керування LLM без залучення зовнішніх хмарних сервісів. Розглянуті LLM gpt-oss-20b і gpt-oss-120b мали однакову квантизацію вагових коефіцієнтів MXFP4 (4,25 біт).

Окремо на рис. 7, 8 проілюстровано, як залежить від тих же умов необхідний обсяг KV-кешу. Крім того, на рис. 9 відображено залежність кількості шарів LLM, які можуть розміститися в GPU NVIDIA RTX 3080 з VRAM 16 ГБ залежно від розмірів контекстного вікна. При цьому решта моделі монтується на вінчестер або SSD. Таке розподілення шарів зменшує швидкість інференсу, однак не позбавляє LLM працездатності.

Важливо звернути увагу, що в рамках мультиагентної системи окремі агенти можуть виконуватися як на основі згорткових нейромереж (CNN) [22], так і на різних

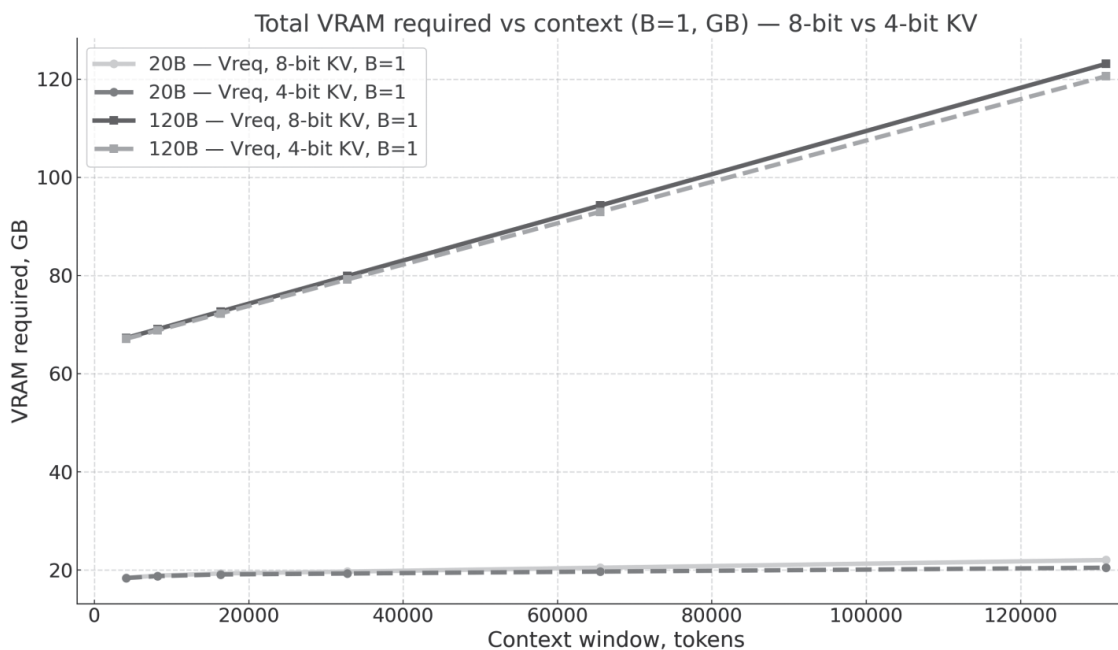
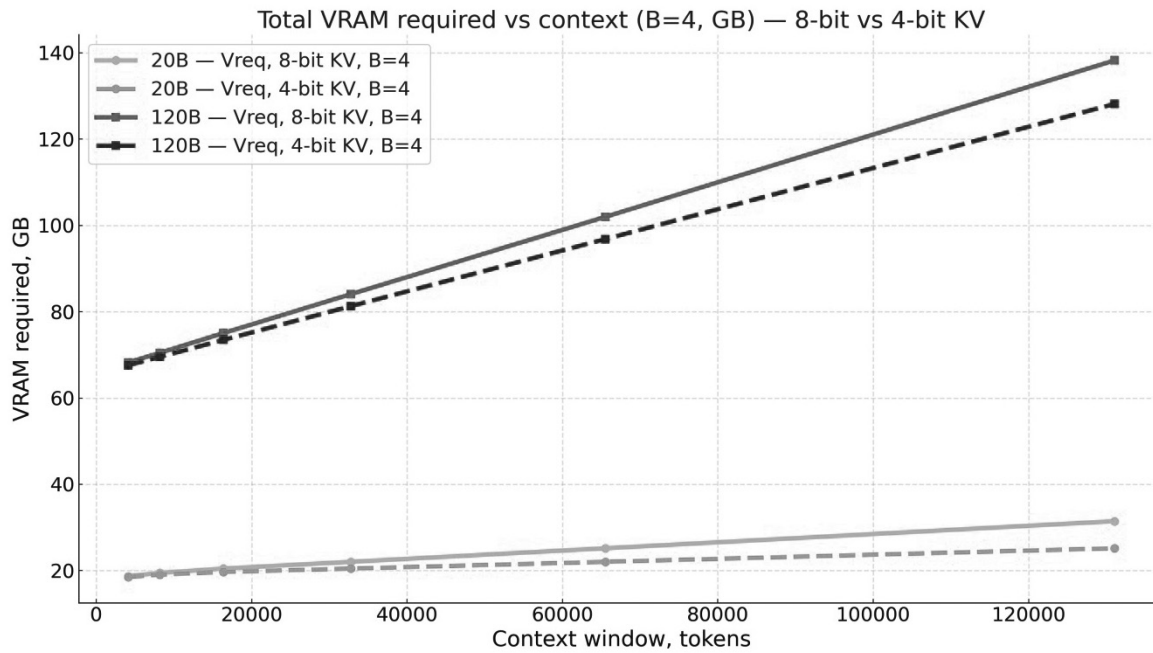
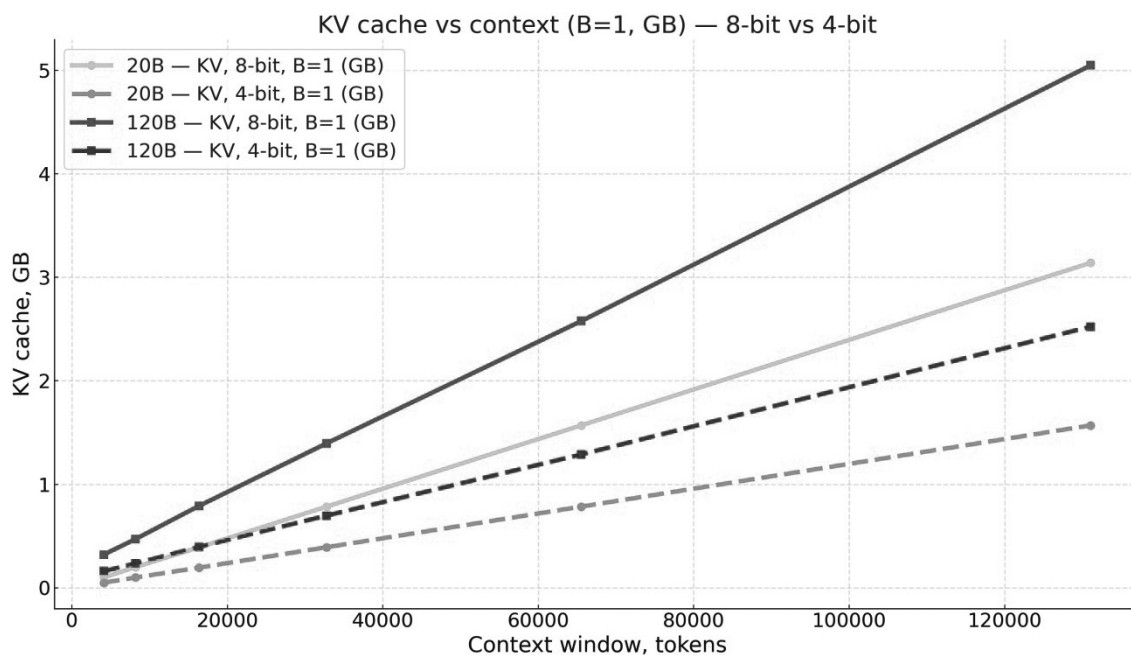


Рис. 5. Залежність необхідного обсягу VRAM при B=4 для повного розташування LLM gpt-oss-20b та gpt-oss-120b



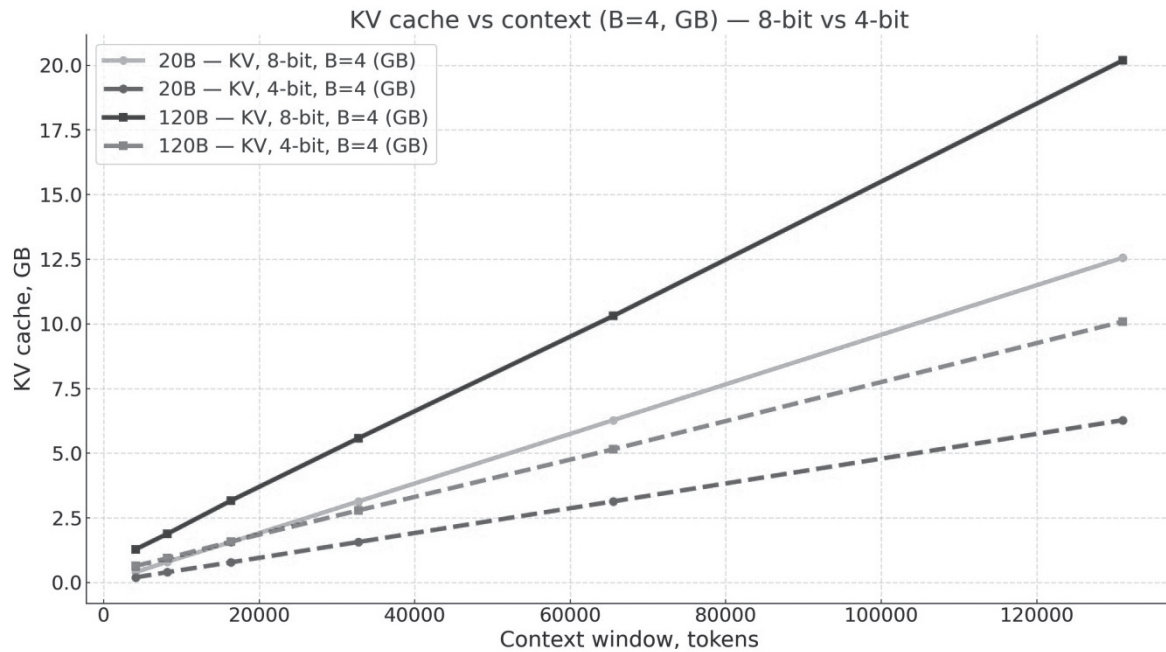
Р и с . 6. Залежність необхідного обсягу VRAM при B=1 для повного розташування LLM gpt-oss-20b та gpt-oss-120b



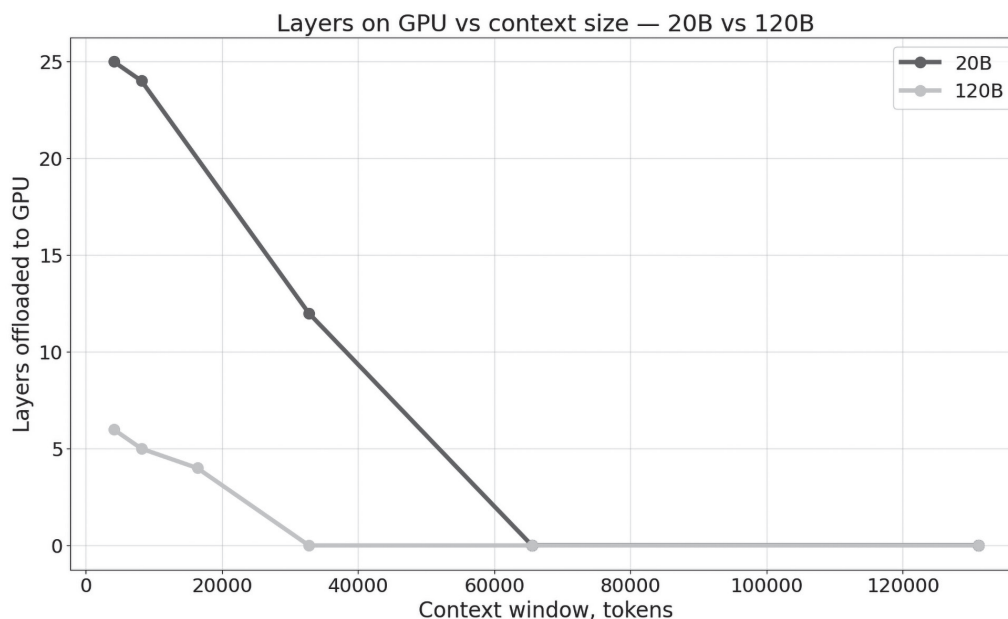
Р и с . 7. Залежність розмірів KV-кешу від його розрядності та контекстного вікна при одному конвеєрі (B=1)

варіантах LLM. За потреби, вказані вище локальні мовні моделі можуть бути піддані фін-тюнінгу [23] з метою налаштування їх вагових коефіцієнтів під специфічні вимоги до агентів. При відсутності конфіденційних даних, частина агентів може бути виконана на основі пропріетарних LLM типу GPT-5 [24], Gemini [25], Claude [26] та ін. В усіх зазначених випадках можливе поєднання кількох агентів на одній LLM з розмежуванням їх функцій на рівні промту. Для побудови робочих процесів множини агентів може використовуватися платформа автоматизації п8n з її локальним розгортанням [27] та аналогічні розробки для створення агентів Microsoft Power Automate [28], Amazon Bedrock AgentCore [29], openEnv [30] тощо.

Ключовою технічною передумовою прискорення циклу випробувань на основі мультиагентності є повний цифровий ланцюг від тактико-технічних вимог до підтвердження їх реалізації у випробуваному зразку. З одного боку, цей ланцюг має спиратися на вказану базу знань типу RAG з графом сутностей, куди потрапляють вимоги, методики, сценарії, сенсори, калібрування, метрики і артефакти. З іншого боку, цифровий остов випробувань передбачає стандартизований обмін даними з полігонним обладнанням, симуляторами і лабораторіями, який забезпечує узгоджені іменовані часові ряди, єдині моделі невизначеності і повторюваність обчислень у контейнерах. Така конструкція дає змогу різко скоротити підготовчі цикли, уникнути ручного переписування



Р и с . 8. Залежність розмірів KV-кешу від його розрядності та контекстного вікна при 4 конвеєрах (B=4)



Р и с . 9. Кількість шарів LLM, що можуть розміститися в GPU з VRAM 16 ГБ залежно від контекстного вікна

даних, уніфікувати обробку і за необхідності повторити будь-який результат незалежно від місця і часу.

Обґрунтування ефекту прискорення полягає у поєднанні кількох узгоджених механізмів. По-перше, автоматизація вилучення вимог і формування матриці трасування процесів випробувань звільняє тижні експертної праці і зменшує помилки інтерпретації, водночас підсилюючи контроль повноти покриття перевітками усіх показників ОВТ. По-друге, сценарний агент на основі принципу цінності інформації скорочує кількість натурних випробувань, зберігаючи їх здатність виявляти дефекти у критичних режимах, і переносить лівову частку експериментів на цифрового двійника та апаратно-програмні стенди. Крім того, агент протоколювання переводить довгі ручні цикли звітності в режим напівавтоматичної збірки доказів із перевіреною простежуваністю, що одночасно прискоро-

рює аудити і сертифікацію. В свою чергу, оркестратор із зворотним зв'язком адаптує план у міру надходження даних, закриваючи невизначеності на ранніх етапах і не допускаючи накопичення дорогих проблем у фіналі.

Архітектурно до описаної системи доцільно закласти декілька горизонтальних сервісів. Наприклад, сервіс управління даними має відповідати за каталогізацію, контроль версій, політики зберігання, анонімізацію, реплікацію і відновлення. Сервіс моделювання і цифрових двійників надає фізичні симуляції і когорту еталонних сценаріїв з відомими параметрами. Сервіс якості моделей включає перевірки упередженості, стійкості до дезінформації і механізми узгодження відповідей агентів із надійними зовнішніми джерелами, щоби мінімізувати ризик хибних висновків. Вказані та інші сервіси теж можуть контролюватися окремими агентами.

Організаційна модель функціонування мультиагентної системи передбачає чіткий розподіл ролей. Керівник випробувань визначає цілі, ризики і критерії прийняття результатів перевірок. Технічні фахівці затверджують матрицю трасування і методики. Офіцер з безпеки контролює політику доступу і відповідність регламентам. Аналітики даних здійснюють вибіркву верифікацію автоматичної обробки, налаштовують пороги і проводять аналіз відхилень. Усі ролі спираються на єдині джерела інформації, а система фіксує кожне рішення, мотив і посилання на артефакти.

З самого початку підготовки до випробувань мають бути формалізовані показники та метрики ефективності мультиагентної системи. Це дозволить уточнити склад агентів та обрати кращі за якістю мовні моделі для їх реалізації. До базових показників належать час від надходження документації до затвердження плану випробувань, час від завершення місії до готового звіту, відсоток вимог із доказами і формальним покриттям. Також доцільно задіяти коефіцієнт повторюваності обробки, середню вартість одного сценарію, показник різноманітності сценаріїв і темп зменшення невизначеності щодо ключових характеристик. На рівні оцінки якості процесів випробувань важливими показниками є частка автоматично виявлених невідповідностей у документації, середній час на аудит і частота відмов через виявлені помилки. Такі метрики дозволяють порівнювати новий підхід із традиційним та об'єктивно демонструвати економію ресурсів.

Оскільки під час випробувань питання безпеки і відповідальності необхідно вирішувати без жодних компромісів, система агентів налаштовується так, щоб навмисно обмежити автономію у випадках, коли існує ризик для персоналу і живучості обладнання або виникає загроза порушення регуляторних вимог. Кожен агент зобов'язаний наводити джерела і межі застосовності своїх висновків, а критичні дії завжди супроводжуються підтвердженням людини. Для зовнішніх інтеграцій запроваджується принцип найменшого привілею і односторонніх каналів передачі даних з полігонів до аналітики. Додатково можуть застосовуватися профілі тестів із штучно внесеними помилками з метою постійної перевірки коректності обробки і стійкості агентів до некоректних вхідних даних.

Практичний робочий процес функціонування мультиагентної системи можна коротко описати наступним чином. На підготовчому етапі на основі наданої технічної документації і обмежень агент вивчення документації формує матрицю вимог до параметрів і пропонує первинний перелік перевірок. Агент сценаріїв доповнює його генерацією мінімального набору тактичних сценаріїв. Оркестратор ранжує їх за цінністю інформації, яку вони можуть надати, і узгоджує з ресурсами, після чого формує проект програми випробувань, перелік необхідних методик. Перед натурними перевірками проводяться прогони методик для верифікації на цифровому двійнику і стендах з уточненням спроможностей наявних сенсорів та їх достатності для досягнення мети випробувань. На полігоні агент протоколювання веде збір і контроль даних у реальному часі, після чого

автоматично формується звітний пакет із прив'язкою до вимог тактико-технічного завдання. Оркестратор періодично переглядає залишкову невизначеність даних за поточними результатами, коригує план і готує наступний цикл перевірок, поки критерії відповідності зразка ОБТ не будуть виконані, або поки не буде доведена необхідність внесення конструктивних змін.

ВИСНОВКИ

Впровадження запропонованої системи доцільно здійснювати поетапно. Відповідна дорожня карта починається з пілотного ядра для досягнення мінімально достатнього функціоналу в межах одного класу виробів. Це дозволяє відпрацювати типові конвеєри даних і шаблони звітності. Далі залучається цифровий двійник і сценарний агент для типових режимів. На наступному етапі масштабуються RAG-сховища, вводиться формальна валідація моделей і повний набір метрик процесу випробувань. Фінальний етап включає сертифікаційні інтеграції, створення міжвідомчих шаблонів і розширення застосування на нові домени озброєння з повторним використанням напрацьованих компонентів.

В цілому така мультиагентна система переводить випробування у прозорий і керований інженерний процес. Вона не підміняє судження фахівців, а знімає рутину, зменшує помилки, гарантує простежуваність і дає можливість розумніше експериментувати в межах затверджених методик випробувань. Поява мультиагентних систем випробувань ОБТ дозволяє досягти прискорення циклів впровадження нових розробок за рахунок скорочення часових і ресурсних витрат на процедури випробувань. Подальший розвиток даного підходу дозволить максимально автоматизувати випробування з залученням в цілодобовому режимі роботизованих платформ, у тому числі андроїдного типу.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Kondratenko, Y., Kondratenko, G., Shevchenko, A., Slyusar, V., Zhukov, Y. & Vakulenko, M. (2023). Towards Implementing the Strategy of Artificial Intelligence Development: Ukraine Peculiarities. *CEUR Workshop Proc.* Vol. 3513. Pp. 106—117. Available at: https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper_09.pdf.
2. Kondratenko, Y., Shevchenko, A., Zhukov, Y., Klymenko, M., Slyusar, V., Kondratenko, G. & Striuk, O. (2023). Analysis of the Priorities and Perspectives in Artificial Intelligence Implementation. 13th Intern. IEEE Conf. «Dependable Systems, Services and Technologies» (DESSERT'2023). Greece. Athens. 8 p. October 13—15. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416432>.
3. Kondratenko, Y.P., Slyusar, V.I., Solesvik, M.B., Kondratenko, N.Y. & Gomolka, Z. (2024). Interrelation and inter-influence of artificial intelligence and higher education systems. *Research Tendencies and Prospect Domains for AI Development and Implementation.* Pp. 31—58.
4. Slyusar, V.I., Kondratenko, Y.P., Shevchenko, A.I. & Yeroshenko, T.V. (2024). Some Aspects of Artificial Intelligence Development Strategy for Mobile Technologies. *J. of Mobile Multimedia.* Vol. 20_3. Pp. 525—554. Available at: [10.13052/jmm1550-4646.2031](https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.2031).

5. Patwardhan, T. et al. GDPval: Evaluating AI Model Performance on Real-World Economically Valuable Tasks. OpenAI. Oct. 2025. Available at: <https://cdn.openai.com/pdf/d5eb7428-c4e9-4a33-bd86-86dd4bcf12ce/GDPval.pdf>. [Accessed: Oct. 25, 2025].
6. Slyusar, V. (2025). Distributed Multi-agent Systems Based on the Mixture of Experts Architecture in the Context of 6G Wireless Technologies. In: Dovgyi, S., et al. (eds). Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1338. Springer. Pp. 81—110. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_6.
7. Zhang, D., Li, Z., Wang, P., Zhang, X., Zhou, Y. & Qiu, X. (2024). SpeechAgents: Human-Communication Simulation with Multi-Modal Multi-Agent Systems. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2401.03945>.
8. Baier, T., Baez Santamaria, S. & Vossen, P. (2022). A modular architecture for creating multimodal agents. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2206.00636>.
9. Слюсар В.І. Результати тестування локальної мовної моделі gpt-oss-20b. XXV Наук.-техн. конф. «Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки». 25 вересня 2025 р. Черкаси: ДНДІ випробувань і сертифікації ОВТ.
10. Bhardwaj, D., Beniwal, A., Chaudhari, S., Kalyan, A., Rajpurohit, T., Narasimhan, K.R., Deshpande, A., & Murahari, V. (2025). Agent context protocols enhance collective inference. arXiv. at: <https://arxiv.org/abs/2505.14569>.
11. Habler, I., Huang, K., Narajala, V. S., & Kulkarni, P. (2025). Building a secure agentic AI application leveraging A2A protocol. arXiv. at: <https://arxiv.org/abs/2504.16902>.
12. Jeong, C. (2025). A study on the MCP × A2A framework for enhancing interoperability of LLM-based autonomous agents. arXiv. at: <https://arxiv.org/abs/2506.01804>.
13. Liu, J., Yu, K., Chen, K., Li, K., Qian, Y., Guo, X., Song, H., & Li, Y. (2025). ACPs: Agent collaboration protocols for the Internet of Agents. arXiv. at: <https://arxiv.org/abs/2505.13523>.
14. Martineau, K. (2025, May 28). The simplest protocol for AI agents to work together. IBM Research. at: <https://research.ibm.com/blog/agent-communication-protocol-ai>.
15. Слюсар В.І. Локальні великі мовні моделі для обробки конфіденційної інформації. Озброєння та військова техніка. 2024. № 4(44). С. 79—91. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4\(44\).79-91](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4(44).79-91).
16. Слюсар В.І., Гусаковський І.П. Практичні аспекти розгортання великих мовних моделей в локальних мережах. Озброєння та військова техніка. 2025. № 1(45). С. 84—96.
17. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W.-t., Rocktäschel, T. et al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems. Vol. 33. Pp. 9459—9474. Available at: <https://arxiv.org/abs/2005.11401>.
18. INSAIT-Institute/MamayLM-Gemma-3-4B-IT-v1.0. Available at: <https://huggingface.co/mradermacher/MamayLM-Gemma-3-4B-IT-v1.0-GGUF>.
19. INSAIT-Institute/MamayLM-Gemma-3-12B-IT-v1.0. Available at: <https://huggingface.co/mradermacher/MamayLM-Gemma-3-12B-IT-v1.0-GGUF>.
20. Lapa LLM. Available: <https://huggingface.co/lapa-llm>. Accessed: Oct. 25, 2025.
21. Agarwal, S. et al. (2025). GPT-OSS-120B & GPT-OSS-20B model card. arXiv. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.10925>.
22. Нос І.А. Особливості формування загальних вимог та технічних умов ОВТ при використанні інформаційних технологій підтримки випробувань в умовах правового режиму воєнного часу. XXV Наук.-техн. конф. «Випробування і сертифікація озброєння та військової техніки». 25 вересня 2025 р. Черкаси: ДНДІ випробувань і сертифікації ОВТ.
23. Parthasarathy, V. B., Zafar, A., Khan, A. & Shahid, A. The Ultimate Guide to Fine-Tuning LLMs from Basics to Breakthroughs: An Exhaustive Review of Technologies, Research, Best Practices, Applied Research Challenges and Opportunities. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2408.13296>.
24. OpenAI, GPT-5 System Card, Aug. 7, 2025. Available at: <https://cdn.openai.com/gpt-5-system-card.pdf>. Accessed: Oct. 25, 2025.
25. Google DeepMind, Gemini 2.5 Deep Think Model Card, Aug. 1, 2025. Available at: <https://storage.googleapis.com/deepmind-media/Model-Cards/Gemini-2-5-Deep-Think-Model-Card.pdf>. Accessed: Oct. 25, 2025.
26. Anthropic, Claude Sonnet 4.5 System Card, Oct. 10, 2025. Available at: <https://www.anthropic.com/claude-sonnet-4-5-system-card>. Accessed: Oct. 25, 2025.
27. n8n – Workflow Automation, GitHub, n8n-io (verified organization). 2025. Available at: <https://github.com/n8n-io>. Accessed: Oct. 25, 2025.
28. Гусаковський І.П., Слюсар В.І., Чепков І.Б. Трансформація робочих процесів: практичне застосування Microsoft Power Automate та Google Gemini для автоматизації аналітики та звітності. Міжнар. наук.-практ. семінар «Проблематика, тенденції та перспективи розвитку воєнної науки та освіти в умовах сучасних глобальних викликів та конфліктів». 26 листопада 2025 р. Київ: Центральний наук.-досл. інст. Збройних Сил України.
29. Amazon Web Services. What is Amazon Bedrock AgentCore? Jul. 16, 2025. Available at: <https://docs.aws.amazon.com/bedrock-agentcore/latest/devguide/what-is-bedrock-agentcore.html>. Accessed: Oct. 25, 2025.
30. OpenEnv: Agentic Execution Environments, Hugging Face organization page. Oct. 22, 2025. Available at: <https://huggingface.co/openenv>. Accessed: Oct. 25, 2025.

REFERENCES

1. Kondratenko, Y., Kondratenko, G., Shevchenko, A., Slyusar, V., Zhukov, Y. & Vakulenko, M. (2023). Towards Implementing the Strategy of Artificial Intelligence Development: Ukraine Peculiarities. CEUR Workshop Proc. Vol. 3513. Pp. 106—117. Available at: https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper_09.pdf.
2. Kondratenko, Y., Shevchenko, A., Zhukov, Y., Klymenko, M., Slyusar, V., Kondratenko, G. & Striuk, O. (2023). Analysis of the Priorities and Perspectives in Artificial Intelligence Implementation. 13th Intern. IEEE Conf. «Dependable Systems, Services and Technologies»

- (DESSERT'2023). Greece. Athens. 8 p. October 13–15. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416432>.
3. Kondratenko, Y.P., Slyusar, V.I., Solesvik, M.B., Kondratenko, N.Y. & Gomolka, Z. (2024). Interrelation and inter-influence of artificial intelligence and higher education systems. *Research Tendencies and Prospect Domains for AI Development and Implementation*. Pp. 31—58.
 4. Slyusar, V.I., Kondratenko, Y.P., Shevchenko, A.I. & Yeroshenko, T.V. (2024). Some Aspects of Artificial Intelligence Development Strategy for Mobile Technologies. *J. of Mobile Multimedia*. Vol. 20_3. Pp. 525—554. Available at: [10.13052/jmm1550-4646.2031](https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.2031).
 5. Patwardhan, T. et al. GDPval: Evaluating AI Model Performance on Real-World Economically Valuable Tasks. *OpenAI*. Oct. 2025. Available at: <https://cdn.openai.com/pdf/d5eb7428-c4e9-4a33-bd86-86dd4bcf12ce/GDPval.pdf>. [Accessed: Oct. 25, 2025].
 6. Slyusar, V. (2025). Distributed Multi-agent Systems Based on the Mixture of Experts Architecture in the Context of 6G Wireless Technologies. In: Dovgyi, S., et al. (eds) *Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIIT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 1338. Springer. Pp. 81—110. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_6.
 7. Zhang, D., Li, Z., Wang, P., Zhang, X., Zhou, Y. & Qiu, X. (2024). *SpeechAgents: Human-Communication Simulation with Multi-Modal Multi-Agent Systems*. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2401.03945>.
 8. Baier, T., Baez Santamaria, S. & Vossen, P. (2022). A modular architecture for creating multimodal agents. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2206.00636>.
 9. Slyusar, V.I. “Rezultaty testuvannya lokalnoi movnoi modeli gpt-oss-20b” [Results of testing the local language model gpt-oss-20b], XXV Nauk.-tekhn. Konf. «Vyprobuvannya i sertyfikatsiia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki». 25 Sept., 2025. Cherkasy: DNDI vyprobuvan i sertyfikatsii OVT.
 10. Bhardwaj, D., Beniwal, A., Chaudhari, S., Kalyan, A., Rajpurohit, T., Narasimhan, K.R., Deshpande, A., & Murahari, V. (2025). Agent context protocols enhance collective inference. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2505.14569>.
 11. Habler, I., Huang, K., Narajala, V. S., & Kulkarni, P. (2025). Building a secure agentic AI application leveraging A2A protocol. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2504.16902>.
 12. Jeong, C. (2025). A study on the MCP × A2A framework for enhancing interoperability of LLM-based autonomous agents. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2506.01804>.
 13. Liu, J., Yu, K., Chen, K., Li, K., Qian, Y., Guo, X., Song, H., & Li, Y. (2025). ACPs: Agent collaboration protocols for the Internet of Agents. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2505.13523>.
 14. Martineau, K. (2025, May 28). The simplest protocol for AI agents to work together. IBM Research. Available at: <https://research.ibm.com/blog/agent-communication-protocol-ai>.
 15. Slyusar, V.I. (2024). “Lokalni velyki movni modeli dlia obrobky konfidentsiinoi informatsii” [Local large language models for confidential information processing]. *Weapons and Military Equipment*. № 4(44). Pp. 79—91. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4\(44\).79-91](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.4(44).79-91).
 16. Slyusar, V.I. & Husakovskiy, I.P. (2025). “Praktychni aspekty rozgortannia velykykh movnykh modelei v lokalnykh merezhakh” [Practical aspects of deploying large language models in local networks]. *Weapons and Military Equipment*. № 1(45). Pp. 84—96. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1\(46\).84-96](https://doi.org/1034169/2414-0651.2024.1(46).84-96).
 17. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W.-t., Rocktäschel, T. et al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 33. Pp. 9459—9474. Available at: <https://arxiv.org/abs/2005.11401>.
 18. INSAIT-Institute/MamayLM-Gemma-3-4B-IT-v1.0. Available at: <https://huggingface.co/mradermacher/MamayLM-Gemma-3-4B-IT-v1.0-GGUF>.
 19. INSAIT-Institute/MamayLM-Gemma-3-12B-IT-v1.0. Available at: <https://huggingface.co/mradermacher/MamayLM-Gemma-3-12B-IT-v1.0-GGUF>.
 20. Lapa LLM. Available at: <https://huggingface.co/lapa-llm>. Accessed: Oct. 25, 2025.
 21. Agarwal, S. et al. (2025). GPT-OSS-120B & GPT-OSS-20B model card. arXiv. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.10925>.
 22. Nos, I.A. “Osoblyvosti formuvannya zahalnykh vymoh ta tekhnichnykh umov OVT pry vykorystanni informatsiinykh tekhnolohii pidtrymky vyprobuvan v umovakh pravovoho rezhymu voiennoho chasu” [Peculiarities of formulating general requirements and technical specifications for armaments and military equipment when using information technologies for test support under the legal regime of martial law]. XXV Nauk.-tekhn. konf. «Vyprobuvannya i sertyfikatsiia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki». 25 Sept., 2025. Cherkasy: DNDI vyprobuvan i sertyfikatsii OVT.
 23. Parthasarathy, V. B., Zafar, A., Khan, A. & Shahid, A. *The Ultimate Guide to Fine-Tuning LLMs from Basics to Breakthroughs: An Exhaustive Review of Technologies, Research, Best Practices, Applied Research Challenges and Opportunities*. arXiv. Available at: <https://arxiv.org/abs/2408.13296>.
 24. OpenAI, GPT-5 System Card, Aug. 7, 2025. Available at: <https://cdn.openai.com/gpt-5-system-card.pdf>. Accessed: Oct. 25, 2025.
 25. Google DeepMind, Gemini 2.5 Deep Think Model Card, Aug. 1, 2025. Available at: <https://storage.googleapis.com/deepmind-media/Model-Cards/Gemini-2-5-Deep-Think-Model-Card.pdf>. Accessed: Oct. 25, 2025.
 26. Anthropic, Claude Sonnet 4.5 System Card, Oct. 10, 2025. Available at: <https://www.anthropic.com/claude-sonnet-4-5-system-card>. Accessed at: Oct. 25, 2025.
 27. n8n – Workflow Automation, GitHub, n8n-io (verified organization). 2025. Available at: <https://github.com/n8n-io>. Accessed at: Oct. 25, 2025.
 28. Husakovskiy, I.P., Slyusar, V.I. & Chepkov, I.B. “Transformatsiia robochykh protsesiv: praktychne zastosuvannya Microsoft Power Automate ta Google Gemini dlia avtomatyzatsii analityky ta zvitnosti. Mizhnarodnyi naukovo-praktychnyi seminar «Problematyka, tendentsii ta perspektyvy rozvytku voiennoi nauky ta osvity v

- umovakh suchasnykh hlobalnykh vyklykiv ta konfliktiv»” [Transformation of workflows: practical application of Microsoft Power Automate and Google Gemini for the automation of analytics and reporting]. 26 Nov., 2025. K.: Tsentralnyi nauk.-dosli. inst. Zbroinykh Syl Ukrainy.
29. Amazon Web Services. What is Amazon Bedrock AgentCore? Jul. 16, 2025. Available at: <https://docs.aws.amazon.com/bedrock-agentcore/latest/devguide/what-is-bedrock-agentcore.html>. Accessed: Oct. 25, 2025.
30. OpenEnv: Agentic Execution Environments, Hugging Face organization page. Oct. 22, 2025. Available at: <https://huggingface.co/openenv>. Accessed: Oct. 25, 2025.

Slyusar V.I.

MULTI-AGENT SYSTEM FOR SUPPORTING THE TESTING OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

The article proposes a multi-agent system for supporting the testing of weapons and military equipment, which consists of a set of specialized intelligent agents with clearly defined functions. The basic ones are the agents for technical documentation analysis, test result formalization, tactical scenario generation, and the logistics support agent. Separate attention is paid to the role of the orchestrator, the user interaction agent, and the cybersecurity agent. Such a combination creates an end-to-end Machine-in-the-Loop cycle in which the planning, execution, and analysis of tests take place as a controlled engineering process with transparent traceability and the possibility of rapid repetition. The article also considers the practical feasibility of the proposed architecture thanks to modern language models. On the one hand, the infrastructure of the n8n automation platform and of industrial-class platforms such as Amazon Bedrock AgentCore already provide a managed environment for deploying agents. On the other hand, local Ukrainian-language multimodal models MamayLM-Gemma-3 and Lapa already support working with text and images, large context windows, and are capable of processing technical materials in Ukrainian.

This makes it possible to perform analysis of documentation and visual data without moving sensitive information outside the controlled environment. The article concludes that the multi-agent system for testing weapons and military equipment can transform testing from a slow sequential mode into a fast iterative cycle with digital tracing of requirements, automated scenario generation, continuous data collection and analysis, semi-automated reporting, and controlled logistics. This creates the preconditions for a significant reduction of the time required to introduce new samples of weapons and military equipment down to the level of weeks or even days without compromises in safety, reproducibility, and compliance with regulatory requirements.

Keywords: artificial intelligence, multi-agent systems, large language models.

Відомості про автора:

Слюсар Вадим Іванович

доктор технічних наук, професор
начальник групи головних наукових співробітників
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2912-3149>
e-mail: swadim@ukr.net

Information about the author:

Slyusar Vadym

Doctor of Technical Sciences, Professor
Group of Chief Research Scientists for Scientific Research
Management of 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

Стаття надійшла до редколегії 27.10.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 623.419:004.5

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1\(49\).76-83](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1(49).76-83)**Р. М. ЖИВОТОВСЬКИЙ**, кандидат технічних наук
старший дослідник<https://orcid.org/0000-0002-2717-0603>

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ФОРМАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

У статті запропоновано методику формалізації даних для побудови цифрових двійників засобів повітряного нападу: балістичних і крилатих ракет, керованих авіабомб та ударних безпілотних літальних апаратів одноразової дії. Теоретично окреслено базові поняття («вихідні дані», «формалізація», «інформаційний контур»), класифіковано дані (тактико-технічні характеристики, бортові системи, сценарії, телеметрія, математичні моделі) та сформовано критерії повноти/достовірності (джерело, узгодженість, похибка). Показано, що запропонована методика формалізації даних забезпечує системність, відтворюваність і масштабованість процесу створення цифрових двійників засобів повітряного нападу.

Ключові слова: методики формалізації даних, цифрові двійники, засоби повітряного нападу, балістичні та крилаті ракети, керовані авіаційні бомби, безпілотні літальні апарати.

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена посиленням ролі цифрових двійників як ключового інструменту сучасного інженерного аналізу, моделювання й прийняття рішень у військовій сфері. Удосконалення засобів повітряного нападу (ЗПН) та поширення комплексних «ракетно-дронових» загроз висуває підвищені вимоги до достовірного прогнозування їх поведінки в реальних умовах бою, що неможливо досягти без уніфікованої методики збору, формалізації і верифікації вихідних даних. Розроблення такої методики дозволяє знизити витрати і ризики натурних випробувань, прискорити процес проектування і калібрування моделей, підвищити якість симуляцій для планування ударів, оцінювання уразливості й навчання особового складу. Крім того, уніфіковані формати даних і процедурні підходи сприяють сумісності моделей у межах «цифрового поля бою» та інтеграції з аналітичними і ШІ-інструментами для автоматичного оновлення двій-

ників. На фоні фрагментарності наявної нормативної бази і розрізненості джерел інформації, запропонована методика заповнює методичну прогалину й створює основу для відтворюваних, масштабованих і надійних цифрових моделей ЗПН.

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНОГО АНАЛІЗУ

За останнє десятиліття цифрові двійники (ЦД) (digital twins, DT) перетворилися з окремих дослідницьких ініціатив у фундаментальну парадигму цифрової інженерії та системного моделювання. У воєнно-технічній сфері цю трансформацію очолили ключові оборонні організації – зокрема, Департамент оборонних розробок США, що у своєму стратегічному документі «DoD Digital Engineering Strategy» формалізував прагнення до переходу на цифрові архітектури життєвого циклу озброєнь, уніфікації цифрових клонів та інтеграції моделей для забезпечення повторюваних, керованих інженерних процесів [1]. НАТО через свою організацію з науки і технологій (STO) активно досліджує питання розробки DT-архітектур для багатокомпонентних платформ і проблеми взаємосумісності моделей у багатонаціональному середовищі [2, 3]. Європейське оборонне агентство (EDA) ініціює проекти щодо прикладного застосування ЦД у різних бойових доменах, зосереджуючись на концептах інтеграції, інтероперабельності та обміну даними між службами й країнами-членами [4].

Китайські публікації та аналітичні матеріали свідчать про активну інтеграцію ідей цифрових двійників у концепції «інтелектуалізації» ведення бойових дій та модернізації Збройних Сил КНР, зокрема в контексті підвищення ефективності моделювання та прогнозування результатів застосування високоточної зброї [5]. Водночас, міжнародні підходи відрізняються за ступенем відкритості: у НАТО й ЄС великий наголос робиться на стандартах, сумісності та спільних тест-середовищах; у США – на інтеграції ЦД у процеси закупівель і життєвого циклу; в Китаї – на швидкому впровадженні ЦД як частини національної стратегії «інтелектуалізації» оборони [1-5].

Цивільні кейси у галузі створення цифрових двійників демонструють готові технології й методики, корисні для військового застосування. Такі провідні промислові компанії, як Siemens, GE, Boeing тощо реалізують концепцію цифрових двійників для складних технічних систем, що включає моделювання аеродинаміки, двигунів, їх експлуатаційних режимів і прогнозної діагностики [6, 7]. Галузеві підходи передбачають: формалізовані формати даних і master-data management (методологія та технологічна архітектура для створення єдиного джерела правдивих даних про ключові об'єкти системи, що забезпечує цілісність, сумісність і керованість даних у всіх підсистемах цифрового середовища); інтеграцію CAD/CAE/PLM/ІoT; використання HIL/SIL для тестування програмного забезпечення та алгоритмів; застосування аналітики і ШІ для предиктивного обслуговування. Ці методи є релевантними для побудови ЦД ЗПН, оскільки дозволяють поєднати фізичні моделі (аеродинаміка, термодинаміка), бортові вимірювання (телеметрія) і оперативні сценарії в єдиному інформаційному контурі [6, 8, 9].

В Україні нарощується нормативна підтримка окремих компонентів технологій цифрового двійника: прийняття національних версій міжнародних стандартів щодо BIM (Building Information Modeling), обміну даними та архітектурних підходів, що засвідчує наявність технічної бази для формалізації деяких класів метаданих і структури даних (наприклад, впровадження національних варіантів ISO/TS 12911 та суміжних документів) [10]. Академічні та прикладні дослідження українських закладів (наприклад, дисертаційні роботи та наукові огляди) вже розглядають особливості реалізації DT-технологій у наших умовах, зокрема питання подання мультимодальних тимчасових даних і інтеграції локальних телеметричних джерел [11, 12]. Проте в українських нормативних документах поки відсутні спеціалізовані документи, які б детально регламентували формалізацію технічних даних для озброєння та військової техніки (ОВТ) або задавали міжсекторні правила обміну критеріями довіри до даних у контексті ЦД. Наявні ДСТУ частково регламентують окремі аспекти (BIM, GIS, формати даних), але не забезпечують повного набору правил і процедур, необхідних для створення та валідації ЦД зразків ОВТ у масштабах підрозділу чи об'єднаного поля бою [9–11].

На основі проведеного аналізу можна виділити наступні слабкі місця щодо стандартизації ЦД для ОВТ: відсутність уніфікованих національних стандартів щодо метаданих телеметрії та тактикотехнічних характеристик ОВТ; недостатня нормативна база для верифікації та сертифікації DT-моделей у військовому застосуванні; обмежена робота над питаннями міжоперабельності ЦД між різними постачальниками та союзними партнерами (інтероперабельність моделей, форматів, семантики даних); недостатній акцент на процедурній частині оброблення класифікованих даних у DT-контексті (політика доступу, еталони довіри тощо) [2, 3, 9]. Зазначені слабкі місця уможливають ситуацію, коли технічні інструменти існують, але їх прикладне застосування в оборонній сфері уніфіковано не регламентоване, що підвищує ризики помилок при інтеграції моделей і зменшує довіру до результатів симуляцій.

Отже, поточний аналіз демонструє, що попри наявність потужних методологічних підходів та технічних рішень у провідних країнах, існує суттєва потреба у формалізації вітчизняних методик з чіткою специфікацією форматів даних, процедур валідації/верифікації та правил інтеграції телеметрії й експериментальних даних у ЦД для ОВТ. Відсутність таких прикладних методик ускладнює відтворюваність і достовірність моделей, обмежує можливості масштабного використання ЦД в інтересах Сил оборони України і вимагає системного підходу до розроблення стандартів, що поєднують міжнародні практики з національними вимогами безпеки та доступності даних.

Метою статті є розроблення методики формалізації даних для побудови цифрових двійників ЗПН, що забезпечує достовірне моделювання та інтеграцію з цифровим бойовим простором.

Теоретичні аспекти формалізації даних для побудови цифрових двійників засобів повітряного нападу

Відповідно логіки викладення наведених в статті результатів дослідження розглянемо визначення наступних понять: «вихідні дані», «формалізація» та «інформаційний контур цифрового двійника».

Вихідні дані – це сукупність параметрів, характеристик і вимірювань, які відображають фізичні, технічні та функціональні властивості реального об'єкта, у даному випадку ЗПН (ракети, безпілотний літальний апарат, пускової установки тощо) та використовуються для створення її цифрової копії [14].

Формалізація означає упорядкування, кодування і представлення цих даних у структурованому, машинно-читабельному вигляді, який дозволяє здійснювати математичне моделювання, симуляцію та аналітичні розрахунки без втрати семантики і точності [15].

Під інформаційним контуром цифрового двійника розуміється інтегрована система зв'язків між підсистемами збирання, оброблення, зберігання, передавання й аналізу даних, що забезпечує безперервний обмін інформацією між реальним об'єктом і його цифровою моделлю [16]. Такий контур охоплює сенсорні джерела (телеметрія, датчики), програмно-аналітичні модулі (моделі аеродинаміки, управління, РЕБ) та інтерфейси з системами командування, логістики і технічного забезпечення.

Вище наведений аналіз науково-методичних розробок та нормативної бази дозволив визначити інструменти та підходи, які можуть бути використані у подальшому. Наступним завданням стає формалізація вихідних даних та технічних характеристик ЗПН, що досліджуються, оскільки саме цей етап відкриває можливість переходу до практичного моделювання.

Формалізація вихідних даних та тактико-технічних характеристик (ТТХ) досліджуваних зразків зброї є ключовим етапом у процесі побудови цифрових клонів. Саме на цьому етапі здійснюється систематизація та уніфікація інформації щодо конструктивних параметрів, функціональних можливостей і режимів застосування балістичних і крилатих ракет (БР, КР), керованих авіаційних бомб (КАБ) та ударних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) одноразового використання. Визначення чіткої структури даних забезпечує коректність подальшого математичного та програмного моделювання, а також дозволяє узгодити параметри цифрових моделей із реальними зразками озброєння.

З огляду на складність і багатокomпонентність об'єктів дослідження, формалізація даних включає встановлення єдиних форматів представлення ТТХ, визначення критичних параметрів, що впливають на бойову ефективність, та врахування обмежень, пов'язаних із доступністю інформації. Такий підхід дозволяє не лише підвищити достовірність майбутніх розрахунків, а й створює основу для багаторазового використання цифрових моделей у різних сценаріях бойового застосування.

Зазвичай, у межах формалізації даних для ЦД ЗПН важливим є створення стандартизованої моделі даних, яка б дозволяла забезпечити узгодженість між фі-

зичними вимірюваннями, математичними моделями та операційними сценаріями їх застосування. Процес формалізації даних для побудови ЦД ЗПН передбачає розподіл вхідної інформації за категоріями, що відображають функціональну структуру ЗПН. В табл. 1 наведено типовий структурований перелік вихідних даних, їх приклади та джерела отримання, на основі яких можна будувати цифрові клони та моделі застосування ЗПН.

Отже, формалізація вихідних даних та ТТХ ЗПН є незаперечною передумовою для побудови адекватних цифрових клонів: систематизований, уніфікований і

верифікований набір параметрів забезпечує коректність математичних моделей, відтворюваність симуляцій та співставність результатів між різними програмними середовищами. Виділені категорії даних, від детальних ТТХ і описів бортових систем до геоданих, експериментальної телеметрії та нормативно-довідкової інформації, покривають весь інформаційний контур, необхідний для повноцінного представлення фізичної системи у цифровому просторі. Кожна з категорій має свою роль і вагу при моделюванні (наприклад, точність навігаційних моделей прямо залежить від якості даних INS/GNSS, а

Таблиця 1. Систематизація структури вихідних даних для цифрових двійників ЗПН

Категорія даних	Приклади	Джерела отримання
ТТХ зразків	Класи/типи (БР, КР, КАБ, БпЛА-камікадзе); маса/габарити; дальність/швидкість/висота; двигун і паливо; тип/маса БЧ; профіль польоту	Виробники (datasheet, брошури), оборонні каталоги (Jane's, SIPRI Yearbook), публічні оборонні контракти, відкриті технічні описи (CSIS Missile Threat), наукові статті
Бортові системи та канали	INS/GNSS/астронавігація; автопілот і алгоритми керування; РЛС (активна/пасивна), радіовисотомір; телеметрія, протоколи зв'язку; завадостійкість	STANAG/MIL-STD, технічні мануали та патенти, наукові публікації з навігації/РЕБ, звіти про науково-технічну експертизу та оперативні завдання командування ЦНДІОВТ ЗСУ, звіти НАТО/EDA/DoD, матеріали конференцій ION/IEEE/AIAA
Сценарії бойового застосування	Типи цілей (стаціонарні/рухомі); рівень захищеності (укріплені, ППО/РЕБ); профілі ударів (одиначні/масовані/комбіновані); умови ТВД	Польові настанови та доктрини (NATO AJP, JP), відкриті аналітичні огляди, звіти про конфлікти, тренувальні сценарії, навчально-методичні матеріали
Геодані та середовище	Рельєф (SRTM/DTED), карти місцевості, тип поверхні; метео (ERA5, GFS); магнітне/гравітаційне поле; морські умови (хвилювання, вітер)	Відкриті геопортали (USGS, Copernicus), метеослужби (ECMWF, NOAA), наукові реєстри, національні геодезичні служби
Експериментальні/польові дані	Телеметрія випробувань; траєкторії; відхилення/СЕР; журнали подій; дані вібро- та температурних навантажень	Полігонні звіти та протоколи, реєстратори бортових систем, стрілецькі/льотні випробування, стендові тести, ГНСС-трекінг
Математичні/фізичні моделі	3DOF/6DOF динаміка; аеродинаміка; моделі двигунів (Брегета, імпульс/витрата); моделі наведення/фільтрації; РЛ-розсіювання/RCS	Підручники/монографії з балістики/аеродинаміки, AIAA/IEEE/ASME публікації, довідники, відкриті бібліотеки (NASA, NRL), академічні курси
Моделі навігації/керування	Алгоритми INS/GNSS-інтеграції (Kalman/UKF), автопілот/трекінг, guidance & control, компенсація вітру/похибок, логіка переходів	Наукові статті ION/AIAA/IEEE, дисертації, відкриті реалізації (MATLAB/Simulink toolboxes), патенти, навчальні матеріали виробників сенсорів
Моделі РЛС/РЕБ та зв'язку	Виявлення/супроводження (CFAR, трекари), канали даних (link budget), моделі перешкод, завадозахищені протоколи, антиперешкодні GNSS	STANAG/MIL-STD, підручники з РЛС/РЕБ, NATO STO звіти, IEEE RadarConf, матеріали виробників РЛ-станцій і приймачів
Валідація/верифікація цифрового двійника	Порівняння з полігонними пусками; калібрування параметрів; чутливісний аналіз; Monte-Carlo; оцінка точності (СЕР, σ)	Стандарти V&V (IEEE/AIAA), методичні рекомендації DoD/NASA, результати контрольних пусків, незалежні аудити/рев'ю
Інструменти ПЗ та цифровий контур	MATLAB/Simulink, Modelica, ANSYS/CFD/FEA, STK/AGI, OpenFoam, ROS; PLM/MBSE (SysML), digital thread/data lake	Вендорна документація (MathWorks, Ansys, AGI), керівництва MBSE (INCOSE), репозиторії GitHub, навчальні курси
Нормативно-довідкова база	STANAG, MIL-STD, AOP; довідники з балістики/аеродинаміки; технічні регламенти; настанови з експлуатації	NATO Standardization Office, DoD ASSIST, нац. стандартизація, бібліотеки університетів/МО, виробники
Обмеження/вихідні умови	Діапазони похибок сенсорів; енергетичні/масові ліміти; часові затримки каналів; класифікаційні обмеження даних	Технічні ТЗ/SoR, паспорти виробів, стандарти якості/безпеки, політики доступу до даних
Цивільні аналоги та best practices	Авіаційні ДТ (двигуни/планер), автопілот авто/БпЛА, цифрові полігони (HIL/SIL), predictive maintenance	Boeing/GE/Rolls-Royce кейси, Siemens/Simcenter/PLM, ISO/IEC 30182/30147, галузеві журнали та кейс-стаді
Джерела відкритої інформації про ракети	Missile Threat (CSIS), Jane's, The Drive/WarZone (аналітика), SIPRI, офіційні релізи МО/вендорів	CSIS, Janes, SIPRI, прес-релізи ВПЦ/ВМС/вендорів, наукові бази (IEEE/AIAA/Scopus)

адекватність моделі ураження – від достовірності параметрів бойової частини та профілю траєкторії).

Уніфікація форматів представлення і виокремлення критичних параметрів дають змогу перейти від розрізнених технічних описів до єдиної інформаційної моделі. Це спрощує обмін даними між модулями цифрового двійника, дозволяє автоматизувати процедури калібрування та валідації, а також створює передумови для масштабування (масової серії симуляцій, інтеграції в цифрове поле бою, об'єднання з двійниками інших систем). Одночасно, системний підхід до класифікації вихідних даних дозволяє чітко формулювати припущення і межі застосовності моделі – що критично для трактування результатів симуляцій і прийняття інженерних рішень.

Практична ефективність цифрових двійників значною мірою залежить від наявності емпіричних і полігонних даних для калібрування: без регулярного підживлення моделей реальною телеметрією і результатами випробувань ризик невідповідності між віртуальним і фізичним поведінками залишається суттєвим. Тому запропонована методика має включати не лише формалізацію статичних ГТХ, а й процедури збору, попереднього оброблення й інтеграції польотної телеметрії, журналів подій і стендових тестів; окрему увагу слід приділити документуванню джерел і ступеню довіри до кожного набору даних.

Окремою складовою формалізації є врахування обмежень: технічних (похибки сенсорів, часові затримки каналів), організаційних (доступність і класифікація даних) та фізичних (енергетичні ліміти, масові обмеження). Явне включення цих обмежень у структуру вихідних даних дозволяє коректно формулювати сценарії “worst-case” та виконувати чутливий аналіз (наприклад, Monte-Carlo), необхідний для оцінки стійкості рішень у реальних умовах. Формалізація вихідних даних створює не лише технічну, але й методичну платформу для подальших етапів дослідження: розробки математичних моделей руху і аеродинаміки, реалізації модулів навігації і РЕБ, інтеграції в програмне середовище симуляції та валідації цифрових клонів. Рекомендовано на цьому етапі затвердити єдиний набір метаданих і форматів, визначити мінімальний «обов'язковий» перелік параметрів для кожного класу зразків і закласти процедурні вимоги до джерел даних та їхньої верифікації – це забезпечить системність, відтворюваність і надійність подальших наукових та інженерних результатів.

Процес формалізації можна представити у вигляді структурної схеми, де кожен клас даних є окремим блоком із визначеними зв'язками. Умовно її можна подати як багаторівневу систему (рис. 1): рівень 1 – первинні дані: ГТХ, експериментальні вимірювання, телеметрія; рівень 2 – аналітичні моделі: аеродинамічні, баллістичні, навігаційні, енергетичні; рівень 3 – інтеграційні модулі: алгоритми керування, симуляція сценаріїв, прогнозні моделі; рівень 4 – інтерфейс взаємодії: візуалізація, обмін із цифровим полігоном, зворотний зв'язок у реальному часі.

Ця схема (рис. 1) ілюструє потенційну можливість узгодженості між блоками: дані телеметрії слугують



Рис. 1. Структурна схема формалізації даних для побудови ЦД ЗПН

базою для уточнення моделей, моделі – для прогнозування поведінки системи, а сценарії – для верифікації достовірності прогнозів [17].

Відомо, що повнота даних визначається наявністю всіх необхідних параметрів, що впливають на функціонування системи (наприклад, для ракети – коефіцієнтів підйомної сили, маси палива, характеристик системи керування). Тому достовірність пропонуємо оцінювати за трьома основними критеріями: джерело походження – наявність перевірених або сертифікованих джерел (військові стандарти, результати випробувань); рівень узгодженості – відсутність суперечностей між різними наборами даних (наприклад, між польотними логами і моделями динаміки); оцінка похибок – статистичне порівняння прогнозованих і вимірених параметрів. В цьому випадку доцільно використовувати методи чутливого аналізу та багатофакторного порівняння (Monte Carlo, RMSE, NRMSE) для кількісного оцінювання відповідності моделей реальним даним [18].

Побудована структурна схема формалізації даних (рис. 1) відображає логіку перетворення вихідної інформації в уніфікований цифровий контур, що забезпечує узгодженість параметрів на всіх етапах створення ЦД ЗПН. Наступним кроком є розуміння алгоритму узгодження даних між різними джерелами – телеметрія ↔ модель ↔ сценарій бойового застосування. Такий алгоритм забезпечує цілісність інформаційного простору, коректність симуляцій і достовірність результатів моделювання. Для забезпечення точності ЦД ЗПН формується цикл узгодження даних, який охоплює такі етапи: попередня інтеграція: збирання телеметричних і статичних параметрів, їх перетворення у єдиний формат (наприклад, JSON/XML); нормалізація: перерахунок одиниць виміру, фільтрація шумів, синхронізація часових міток; калібрування моделі: коригування параметрів математичних моделей на основі реальних польотних даних; валідація: порівняння результатів симуляцій зі спостережуваними даними для оцінювання похибок; зворотне оновлення: внесення змін у сценарії або моделі відповідно до результатів аналізу відхилень.

Слід відзначити, що такий підхід відповідає сучасним принципам Digital Thread і Model-Based Systems Engineering (MBSE), які реалізуються у стандартах ISO 23247 та рекомендаціях INCOSE SE Handbook [19, 20]. Узгодженість між телеметрією, моделлю і сценарієм забезпечує можливість автоматичного оновлення цифрового двійника при надходженні нових даних, що підвищує його адаптивність та аналітичну цінність.

Після теоретичного осмислення понять, класифікації даних та критеріїв їх достовірності логічним продовженням є виклад практичної методики – покрокового опису основних етапів і процедур формалізації даних, необхідних для побудови придатних до валідації ЦД ЗПН.

Основні етапи та сутність методики формалізації даних для створення цифрових двійників засобів повітряного нападу

Методика формалізації даних для створення ЦД ЗПН спрямована на забезпечення повноти, узгодженості та відтворюваності цифрового представлення складних технічних систем – зокрема, балістичних і крилатих ракет, КАБ та ударних БпЛА одноразового використання. Її структура побудована на принципах системного підходу, цифрової інженерії та наскрізної інтеграції даних у межах життєвого циклу зразка озброєння.

Запропонована методика складається з шести логічно взаємопов'язаних етапів (рис. 2): ідентифікації об'єкта моделювання; збору і класифікації даних; формалізації уніфікованих форматів представлення; створення бази даних і цифрового інтерфейсу обміну; валідації та верифікації даних; реалізації програмно-алгоритмічного забезпечення. Важливо розуміти, що кожен етап виконує окрему функцію в логіці переходу від реального зразка ЗПН до цифрової моделі (ЦД), здатної до симуляції, аналітики й інтеграції в середовище цифрових полігонів. Розглянемо більш детально сутність та особливості кожного з етапів методики.

На першому етапі здійснюється системна ідентифікація ЗПН – визначення його типу, складу, рівня деталізації та меж моделі. Наприклад, для ракет класу «земля-земля» визначається структура комплексу (ракета, пускова установка, система управління, ТЗМ, КП), фізико-механічні параметри корпусу, бойова частина, двигун, аеродинамічна схема та система наведення. Для ударного БпЛА – конфігурація планера, тип рушія, тип бойової частини, система автопілоту, телеметричний блок, канали зв'язку, навігаційна підсистема.

На основі аналізу завдань моделювання визначається рівень деталізації ЦД: макрорівень – загальна динаміка польоту, профіль траєкторії; мікрорівень – моделі систем керування, аеродинамічні коефіцієнти, поведінка двигуна. Вибір рівня залежить від мети: навчання, балістичне моделювання, дослідження РЕБ або аналіз стійкості до відмов.

Другий етап передбачає збір та класифікацію даних. Дані формуються з кількох категорій джерел – відкриті джерела: технічні паспорти, довідники Jane's, Missile Threat (CSIS), STANAG, MIL-STD, ISO 23247, публікації IEEE/AIAA, аналітичні звіти оборонних відомств; експериментальні результати: телеметричні записи, журнали полігонних випробувань, дані стендових тестів, результати випробувань електроніки й навігації; нормативні

документи: національні стандарти (ДСТУ ISO 19650, ДСТУ 3973), військові технічні умови, документи системи допусків і перевірок.

Для кожного типу ЗПН створюється класифікаційна матриця параметрів, що охоплює: масо-габаритні, аеродинамічні, енергетичні характеристики; параметри систем навігації та управління (INS/GNSS, автопілот, фільтри Калмана); телеметричні показники (висота, швидкість, перевантаження, оберти, температура); сценарні змінні (тип цілі, відстань, умови ППО, метеофактори). На цьому етапі також формується паспорт об'єкта моделювання, який описує джерела, формат, точність і достовірність кожного набору даних.

Третій етап є ключовим для побудови інтероперабельної інформаційної бази. Дані перетворюються у стандартизовані структури – XML, JSON, CSV або SQL-таблиці, які забезпечують сумісність із CAD/PLM/CAE-середовищами.

Для ТТХ застосовується формат XML з тегами: <mass>, <range>, <speed>, <payload>, <engine_type>, <guidance_system>. Для телеметрії та навігаційних параметрів – JSON-структури, наприклад: {time: "02:35:20", altitude: 1389, velocity: 180, heading: 174.6, pitch: 11.1}. Для результатів випробувань – CSV-формати, придатні для аналітичної обробки у MATLAB або Python.

На цьому етапі формується словник метаданих (metadata schema), який визначає одиниці вимірювання, типи даних, точність, часові мітки та рівень довіри до джерела. Це створює основу для побудови «цифрової нитки» (*Digital Thread*), що об'єднує всі елементи життєвого циклу системи.

На четвертому етапі формалізовані дані інтегруються у базу даних ЦД, побудовану за принципом наскрізного управління даними (*Product Lifecycle Management*). Структура бази включає такі рівні: рівень фізичних параметрів (ТТХ, геометрія, матеріали); рівень функціональних моделей (динаміка, алгоритми керування, профілі польоту); рівень сценаріїв застосування (бойові умови, метео, ППО/РЕБ); рівень результатів моделювання і телеметрії.

Обмін даними може бути реалізований через інтерфейси Digital Thread, що забезпечують взаємодію з CAD (CATIA, SolidWorks), симуляційними системами (MATLAB/Simulink, ANSYS, STK/AGI) та платформами аналітики. Для оперативного моніторингу передбачено REST API з підтримкою JSON та MQTT протоколів.

П'ятий етап гарантує достовірність цифрової моделі через багаторівневу перевірку: верифікація – перевірка відповідності формалізованих даних технічній документації та фізичним параметрам; валідація – порівняння результатів моделювання з телеметриєю або полігонними пусками; чутливісний аналіз (*Sensitivity analysis*) – оцінка впливу похибок окремих параметрів (наприклад, по-



Рис. 2. Основні етапи методики формалізації даних для створення ЦД ЗПН

хибки датчиків INS $\pm 0,05^\circ/\text{год.}$) на траєкторію польоту; статистичне тестування – перевірка розподілу похибок (методи χ^2 , t-тест), оцінка кореляційних залежностей між параметрами швидкості, висоти, кута атаки. Результатом цього етапу є паспорт достовірності моделі, який фіксує ступінь відповідності ЦД реальному об'єкту.

На шостому етапі для реалізації методики формалізації може бути використований комплекс наступних інструментальних засобів: MATLAB/Simulink – побудова математичних моделей динаміки польоту, систем керування, фільтрів навігації; Python (NumPy, Pandas, SciPy) – оброблення масивів телеметричних даних, валідація, візуалізація; Ansys, COMSOL – моделювання аеродинаміки, теплових навантажень, структурної міцності; STK/AGI – візуалізація траєкторій, аналіз покриття сенсорів, прогноз результатів місії; PostgreSQL / MongoDB – реалізація баз даних для Digital Twin; Unity3D / Unreal Engine – 3D-візуалізація цифрових полігонів. Сукупність цих засобів утворює програмно-алгоритмічний контур ЦД, який інтегрує математичні, інформаційні й симуляційні моделі.

Таким чином, запропонована методика формалізації даних забезпечує системність, відтворюваність і масштабованість процесу створення ЦД ЗПН. Її реалізація дозволяє: інтегрувати дані з різнорідних джерел у єдиний цифровий контур; забезпечити верифікованість і достовірність параметрів; створити базу для аналітичного моделювання, прогнозування та навчання персоналу у віртуальному середовищі. Методика є універсальною і може адаптуватися для різних класів засобів ураження – від балістичних ракет до ударних БпЛА дальньої дії – з урахуванням специфіки їхніх систем управління, навігації та профілів польоту.

Напрямами подальших досліджень є експериментальна валідація цифрових двійників на полігоні, кількісне оцінювання невизначеності та стійкості моделей (UQ, sensitivity analysis) та розроблення єдиного мета-даного-шаблону (schema) та національних рекомендацій з формалізації ТТХ.

ВИСНОВКИ

1. В статті встановлено, що формалізація вихідних даних і ТТХ ЗПН забезпечує єдину інформаційну основу для побудови цифрових двійників і коректного моделювання. Визначено повний перелік необхідних категорій даних – від детальних ТТХ та описів бортових систем до геоданих, сценаріїв застосування, емпіричної телеметрії й нормативно-довідкової бази – що дозволяє репрезентувати реальні зразки у цифровому просторі без втрати суттєвих характеристик. Уніфікація форматів та виокремлення критичних параметрів підвищують відтворюваність симуляцій, спрощують калібрування й валідацію моделей та готують підґрунтя для масштабування експериментів і інтеграції з іншими цифровими системами. Показано важливість регулярного підживлення моделей даними випробувань і реальної експлуатації, без чого зростає ризик розходжень між віртуальною та фізичною поведінкою. Окремо враховано технічні, організаційні й фізичні обмеження, що дозволяє коректно формувати «найгірші» сценарії та

виконувати чутливий аналіз. Сукупно це створює методичну і технічну платформу для наступних етапів – розроблення математичних моделей, модулів навігації та РЕБ, побудови контурів верифікації – й дозволяє рекомендувати затвердження єдиного набору метаданих, мінімального обов'язкового переліку параметрів та процедур верифікації джерел як стандарту подальших робіт.

2. Визначено, що теоретичні аспекти формалізації даних визначають концептуальний каркас побудови ЦД ЗПН. Системна класифікація, структурна схема взаємодії підсистем, критерії повноти та достовірності, а також алгоритм узгодження між різними джерелами дозволяють забезпечити єдність фізичної, аналітичної та симуляційної реальностей. Розроблена теоретична база створює підґрунтя для практичної реалізації ЦД у військово-технічних дослідженнях і для подальшого впровадження у стандартизовані процеси цифрової інженерії оборонних систем.

3. Показано, що запропонована методика формалізації даних забезпечує системність, відтворюваність і масштабованість процесу створення ЦД ЗПН. Її реалізація дозволяє: інтегрувати дані з різнорідних джерел у єдиний цифровий контур; забезпечити верифікованість і достовірність параметрів; створити базу для аналітичного моделювання, прогнозування та навчання персоналу у віртуальному середовищі. Методика досить універсальна та адаптивна для різних класів засобів ураження – від балістичних ракет до ударних БпЛА дальньої дії – з урахуванням специфіки їхніх систем управління, навігації та профілів польоту.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering. Digital Engineering Strategy (Approved Print Version). Washington, D.C. 2018. Available at: https://ac.cto.mil/wp-content/uploads/2019/06/2018-Digital-Engineering-Strategy_Approved_PrintVersion.pdf (accessed: 01.10.2025).
2. NATO Science & Technology Organization. Digital Twin Technology Development and Application for Tri-Service Platforms and Systems (STO report). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/digital-twin-technology-development-and-application-for-tri-service-platforms-and-systems/> (accessed: 01.10.2025).
3. NATO STO. Working on the problem of digital twin interoperability (STO publication). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/working-on-the-problem-of-digital-twin-interoperability> (accessed: 01.10.2025).
4. European Defence Agency (EDA). EDDI – EDA study on the use of digital twins for military use (project materials/news). Available at: <https://www.flysisight.it/explore-defence-digital-twins-eddi-eda-study-for-the-next-four-years/> (огляд) (accessed: 01.10.2025).
5. Baughman, J. (2024). The Path to China's Intelligentized Warfare (analytical article). The Cyber Defense Review, Fall. Available at: https://cyberdefensereview.army.mil/Portals/6/Documents/2024-Fall/Baughman_CDRV9N3-Fall-2024.pdf (accessed: 01.10.2025).
6. Siemens, A.G. Digital Twin (official product/technology overview). Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin> (accessed: 01.10.2025).

7. Li, L. et al. (2021). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. White Rose Research Online. Available at: https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/226986/1/Digital_Twin_in_Aerospace_Industry_A_Gentle_Introduction.pdf (accessed: 01.10.2025).
8. Siemens. Smart Manufacturing – White Paper (Digital Twin applications in manufacturing). Available at: https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/it/Smart%20Manufacturing%20-%20White%20paper_tcm56-104562.pdf (accessed: 01.10.2025).
9. NATO Modelling and Simulation Group. Modelling and Simulation guidance and CPoW materials (overview). Available at: <https://www.sto.nato.int/the-collaborative-programme-of-work-cpow/modeling-and-simulation/nato-modelling-simulation-group/> (accessed: 01.10.2025).
10. ДП «УкрНДНЦ». DSTU ISO/TS 12911:2020. Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM) (національна адаптація). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96207 (дата звернення: 01.10.2025).
11. Сулема С.С. Цифрові двійники: подання та обробка темпоральних мультимодальних даних. Дис. ... канд. техн. наук. НТУ України «КПІ». 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf (дата звернення: 01.10.2025).
12. Розроблення моделі застосування (створення цифрових клонів) балістичних та крилатих ракет (наземного, повітряного та морського базування), керованих авіаційних бомб, ударних БпЛА одноразового використання далекої дії в ході ураження наземних об'єктів при різних комбінаціях роботи бортових систем навігації, радіолокації, телеметрії та управління. Звіт щодо виконання оперативного завдання № 1В-25-041. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2025. 161 с.
13. Liu, Y., et al. (2024). A review of digital twin capabilities, technologies, and applications. *J. of Manufacturing Systems*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034624002404> (accessed: 01.10.2025).
14. Grieves, M. & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. Cham: Springer. 27 p.
15. Tao, F., Qi, Q., Liu, A. & Kusiak, A. (2019). Data-driven smart manufacturing. *J. of Manufacturing Systems*. Vol. 48. Pp. 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
16. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital Twin framework for manufacturing. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2021. 36 p.
17. Siemens, A.G. Digital Twin Integration Framework. Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin>.
18. Montgomery, D.C. & Runger, G.C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Hoboken: Wiley. 792 p.
19. INCOSE Systems Engineering Handbook. Hoboken: Wiley. 2023. 672 p.
20. ISO/IEC 30182:2017. Smart city concept model — Guidance for establishing a model for data interoperability. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2017. 28 p.

REFERENCES

1. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering. Digital Engineering Strategy (Approved Print Version). Washington, D.C. 2018. Available at: https://ac.cto.mil/wp-content/uploads/2019/06/2018-Digital-Engineering-Strategy_Approved_PrintVersion.pdf (accessed: 01.10.2025).
2. NATO Science & Technology Organization. Digital Twin Technology Development and Application for Tri-Service Platforms and Systems (STO report). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/digital-twin-technology-development-and-application-for-tri-service-platforms-and-systems/> (accessed: 01.10.2025).
3. NATO STO. Working on the problem of digital twin interoperability (STO publication). Available at: <https://www.sto.nato.int/document/working-on-the-problem-of-digital-twin-interoperability> (accessed: 01.10.2025).
4. European Defence Agency (EDA). EDDI – EDA study on the use of digital twins for military use (project materials/news). Available at: <https://www.flysight.it/explore-defence-digital-twins-eddi-eda-study-for-the-next-four-years/> (огляд) (accessed: 01.10.2025).
5. Baughman, J. (2024). The Path to China's Intelligentized Warfare (analytical article). *The Cyber Defense Review*, Fall. Available at: https://cyberdefensereview.army.mil/Portals/6/Documents/2024-Fall/Baughman_CDRV9N3-Fall-2024.pdf (accessed: 01.10.2025).
6. Siemens, A.G. Digital Twin (official product/technology overview). Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin> (accessed: 01.10.2025).
7. Li, L. et al. (2021). Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction. White Rose Research Online, 2021. Available at: https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/226986/1/Digital_Twin_in_Aerospace_Industry_A_Gentle_Introduction.pdf (accessed: 01.10.2025).
8. Siemens. Smart Manufacturing – White Paper (Digital Twin applications in manufacturing). Available at: https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/it/Smart%20Manufacturing%20-%20White%20paper_tcm56-104562.pdf (accessed: 01.10.2025).
9. NATO Modelling and Simulation Group. Modelling and Simulation guidance and CPoW materials (overview). Available at: <https://www.sto.nato.int/the-collaborative-programme-of-work-cpow/modeling-and-simulation/nato-modelling-simulation-group/> (accessed: 01.10.2025).
10. ДП «УкрНДНЦ». DSTU ISO/TS 12911:2020. Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM) (національна адаптація) [SE «УкрНДНЦ». DSTU ISO/TS 12911:2020. Structure of building information modeling (BIM) standards (national adaptation)]. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96207 (accessed: 01.10.2025).
11. Sulema, E.S. (2020). “Tsyfrovі dviinyky: podannia ta obrobka temporalnykh multimodalnykh danykh (kandydatska/dysertatsiina robota – analiz tekhnolohii tsyfrovyykh dviinykyv)” [Digital twins: presentation and processing of temporal multimodal data (candidate/dissertation work – analysis of digital twin technologies)]. NTU of Ukraine «KPI». 2020. Available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf (дата звернення: 01.10.2025).

- kpi.ua/bitstream/123456789/37251/1/Sulema_diss.pdf (accessed: 01.10.2025).
12. “Rozroblennia modeli zastosuvannia (stvorenna tsyfrovyykh kloniv) balistychnykh ta krylatykh raket (nazemnoho, povitrianoho ta morskoho bazuvannia), kerovanykh aviatsiinykh bomb, udarnykh BpLA odnorazovoho vykorystannia dalekoi dii v khodi urazhennia nazemnykh ob'ektiv pry riznykh kombinatsiakh roboty bortovykh system navihatsii, radiolokatsii, telemetrii ta upravlinnia. Zvit shchodo vykonannia operatyvnoho zavdannia № 1V-25-041” [Development of a model for the application (creation of digital clones) of ballistic and cruise missiles (ground, air, and sea-based), guided aerial bombs, and long-range single-use strike UAVs during the destruction of ground targets using various combinations of onboard navigation, radar, telemetry, and control systems. Report on the completion of operational task №. 1B-25-041]. K.: Central Research Institute of Instrument Engineering of the Armed Forces of Ukraine. 2025. 161 p.
 13. Liu, Y., et al. (2024). A review of digital twin capabilities, technologies, and applications. *J. of Manufacturing Systems*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034624002404> (accessed: 01.10.2025).
 14. Grieves, M. & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. Cham: Springer. 27 p.
 15. Tao, F., Qi, Q., Liu, A. & Kusiak, A. (2019). Data-driven smart manufacturing. *J. of Manufacturing Systems*. Vol. 48. Pp. 157—169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>.
 16. ISO 23247-1:2021. *Automation systems and integration – Digital Twin framework for manufacturing*. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2021. 36 p.
 17. Siemens, A.G. *Digital Twin Integration Framework*. Available at: <https://www.siemens.com/digital-twin>.
 18. Montgomery, D.C. & Runger, G.C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Hoboken: Wiley. 792 p.
 19. INCOSE *Systems Engineering Handbook*. Hoboken: Wiley. 2023. 672 p.
 20. ISO/IEC 30182:2017. *Smart city concept model — Guidance for establishing a model for data interoperability*. Geneva: Intern. Organization for Standardization. 2017. 28 p.

Zhivotovsky R.M.

**DEVELOPING A DATA FORMALIZATION
METHODOLOGY FOR BUILDING DIGITAL
TWINS OF AIR ATTACK SYSTEMS**

The article proposes a practical, end-to-end methodology for data formalization to build digital twins of air attack systems – ballistic and cruise missiles, guided aerial bombs, and one-way attack unmanned aerial vehicles. The relevance of digital twins is substantiated: unified models reduce the volume of live testing, increase simulation fidelity, accelerate design, and support integration into the «digital battlespace». The paper outlines core concepts («source data», «formalization», «information contour»),

classifies data (tactical-technical characteristics, onboard systems, scenarios, telemetry, mathematical models), and establishes completeness/credibility criteria (provenance, consistency, error). A structural scheme is proposed in which telemetry refines models, models predict behavior, and scenarios serve for verification. The methodology comprises six stages: (1) object identification and selection of the level of detail; (2) collection and classification of data from open, experimental, and regulatory sources; (3) formalization into unified formats (XML/JSON/CSV), creation of a metadata dictionary and MDM rules; (4) creation of a database and digital thread (PLM/REST/MQTT) for exchange with CAD/CAE/simulators; (5) validation and verification with sensitivity/statistical analysis (χ^2 , t-test, RMSE, Monte Carlo); (6) software-algorithmic implementation (MATLAB/Simulink, Python, Ansys/COMSOL, STK/AGI, PostgreSQL/MongoDB, Unity/Unreal). Examples are shown for a «surface-to-surface» missile (aerodynamics, control, guidance) and a strike UAV (trajectory, INS/GNSS, telemetry), illustrating alignment of telemetry↔model↔scenario and automatic twin updates under the Digital Thread/MBSE paradigm. Practical value: the methodology ensures simulation reproducibility, experiment scalability, improved strike-planning and training quality; it lays the groundwork for interagency interoperability and metadata standardization. The following directions for further research are identified: range-based validation, quantitative uncertainty (QU) and sensitivity assessment, and development of a national metadata schema and methodological guidelines for digital twins of air attack systems.

Keywords: data formalization methodologies; digital twins; air attack systems; ballistic and cruise missiles; guided aerial bombs; unmanned aerial vehicles.

Відомості про автора:

Животовський Руслан Миколайович

кандидат технічних наук, старший дослідник
начальник науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Повітряних Сил
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2717-0603>
e-mail: ruslan_zhyv@ukr.net

Information about the author:

Zhivotovsky Ruslan

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Head of the Research Department for the Development of Armament and Military Equipment of the Air Force
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2717-0603>
e-mail: ruslan_zhyv@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 03.11.2025.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

УДК 623.983

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1\(49\).84-88](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.1(49).84-88)

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)

Н. В. ГАМАЛІЙ
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>

О. М. ПОЗДНЯКОВА, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>

І. В. АВЕРІЧЕВ
<https://orsid.org/0000-0005-3855-970>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

ЗВУКОВІ ПОЛЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СТАНЦІЙ З ГНУЧКИМИ ПРОТЯЖНИМИ БУКСИРУВАНИМИ АНТЕНАМИ В ПРИСУТНОСТІ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ

Ефективність застосування гідроакустичних станцій (ГАС) з гнучкими протяжними буксируваними антенами (ГПБА) для висвітлення підводної обстановки залежить від наявності в умовах експлуатації обмежуючих границь. Це обумовлено тим, що ГАС з ГПБА зазвичай працюють в області інфразвукових і низьких звукових частот. Розглянута задача визначення звукових полів, що формуються ГАС з ГПБА в умовах наявності обмежуючої границі у вигляді морської поверхні. З використанням методу зображень сформульована розрахункова модель системи тіл «морська поверхня – ГПБА». Методами теорії електрогідропружності отримані аналітичні співвідношення, що описують звукові поля, що формуються морською поверхнею, ГПБА і системою тіл «морська поверхня – ГПБА». Показано, що характеристика спрямованості ГПБА в присутності морської поверхні має форму кардіоїди. Отримані матеріали дозволяють зіставити між собою ефективності застосування ГАС з ГПБА в глибоких морях і морях, де присутній вплив морської поверхні на них.

Ключові слова: звукові поля, гнучка протяжна буксирувана антена, морська поверхня.

ВСТУП

Великі сподівання на ефективність застосування гідроакустичних станцій з гнучкими протяжними буксируваними антенами пов'язані із безмежністю умов їх експлуатації в морських середовищах [1]. Такий підхід відповідає звичайній практиці проектування будь-яких

ГАС. Це обумовлено тим, що на етапі проектування станцій неможливо передбачити весь діапазон змін акустичних умов їх подальшої експлуатації. Для станцій з ГПБА акустичні умови їх експлуатації полягають в наступному. Звичайно, акустична антена ГАС з ГПБА виконується у вигляді дискретної сквідістантної лінійної решітки із малогабаритних п'єзокерамічних перетворювачів. В більшості випадків це заповнені повітрям циліндричні перетворювачі діаметром порядку 18 мм і такою ж довжиною. Конструкція ГПБА буксирується за надводним кораблем або підводним човном на значній відстані і певній глибині Н і має нейтральну плавучість, що запобігає її зануренню на більшу глибину на стопі корабля або човна. Звичайним діапазоном робочих частот ГАС з ГПБА є інфразвукові та низькі звукові частоти від 5–10 Гц до 200–300 Гц. Без будь-яких фізичних пояснень зрозуміло, що на цих частотах більшість морів у хвильовому відношенні стають мілководними. Тому вплив границь розподілу таких, наприклад, як морська поверхня або морське дно на параметри ГПБА суттєво зростають. Тому виникає необхідність в отриманні кількісних значень оцінки названих впливів. До речі, в кораблебудуванні оцінка впливу акустичних умов експлуатації корабля на розміщені в ньому ГАС є звичайною, хоча і дуже складною справою. Саме це було однією з причин, що обумовили: по-перше, озброєння кораблів ГАС з різними гідроакустичними антенами – розміщеними в корпусі корабля і антенами змінної глибини; по-друге, експлуатацію кораблів в різних ходових режимах – звичайному, стоповому та при буксировці антен змінної глибини, по-третє, розробку ГАС для умов безмежного моря.

Метою роботи є дослідження звукових полів ГАС з ГПБА при експлуатації їх в умовах наявності поблизу них морської поверхні розділу «повітря-вода». Це дозволить оцінити ступінь втрати ефективності ГАС з ГПБА в цих конкретних умовах і мати таким чином реальний прогноз виконання поставленої задачі.

ПОСТАНОВКА І РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Розглянемо задачу визначення звукових полів сквідістантною решіткою в присутності морської поверхні розділу «повітря – вода». Будемо рахувати, що решітка утворена із заповнених повітрям малогабаритних циліндричних перетворювачів і знаходиться від морської поверхні на відстані Н. Відносно морської поверхні будемо рахувати, що вона є ідеальною акустично м'якою поверхнею. Акустична м'якість забезпечується наявністю повітря зі сторони морської поверхні розділу «повітря – вода». Ідеальність морської поверхні, яка взагалі має певну схвильованість, має місце, оскільки ГАС працює в області інфразвукових і низьких звукових частот.

Таким чином, в розрахунковій моделі ГАС з ГПБА потрібно врахувати дві «акустично м'які» поверхні. Перша з них Π_1 є плоскою морською поверхнею. Друга Π_2 являє собою циліндричну поверхню ГПБА у вигляді тонкої циліндричної заповненої повітрям п'єзокерамічної оболонки з середнім радіусом r_0 , товщиною h , поляризованої по товщині. Електричний сигнал напругою ψ знімається з електродів, нанесених на зовнішню і внутрішню циліндричні поверхні п'єзокерамічної оболонки. Сама ГПБА

знаходиться в рідині з густиною ρ_1 і швидкістю звуку c_1 і паралельна морській поверхні Π_1 . Вертикальний переріз розрахункової моделі ГПБА в присутності морської поверхні розділу «повітря – вода» і введені для вирішення задачі системи координат наведені на рис. 1.

Шукані звукові поля, які є розв'язком поставленої задачі, можуть бути визначені шляхом сумісного вирішення системи диференціальних рівнянь:

– хвильового рівняння руху пружних середовищ ззовні і всередині перетворювачів антени

$$\Delta\Phi + k^2\Phi = 0; \quad (1)$$

– рівнянь руху тонких оболонок з радіальною поляризацією в зміщеннях

$$\begin{aligned} & \left[1 + \frac{h^2}{12r_0^2} \left(1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^S} \right) \right] \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \\ & + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \frac{h^2}{12r_0^2} \left(1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^S} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{r_0^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\ & - \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{h^2}{12r_0^2} \left(1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^S} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - w - \\ & - \frac{h^2}{12r_0^2} \left(1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^S} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} + \frac{e_{31} r_0}{C_{11}^E} E_r + \\ & + \frac{r_0^2}{h C_{11}^E} q_r - \frac{r_0^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

– рівнянь вимушеної електростатики для п'єзокераміки

$$\vec{E} = -\text{grad}\psi; \text{div}\vec{D} = 0. \quad (3)$$

У виразах (1) – (3): Δ – оператор Лапласа; Φ – потенціал швидкості акустичного поля; k – хвильове число зовнішнього середовища; u і w – кутова і нормальна складові вектора зміщень механічного поля п'єзокерамічної оболонки; γ – густина п'єзокераміки; $C_{11}^E, e_{31}, \varepsilon_{33}^S$ – сталі п'єзокераміки: модуль пружності при нульовій електричній напруженості, п'єзоконстанта і діелектрична проникливість при нульовій деформації;

\vec{E} і \vec{D} – вектори напруженості та індукції електричного поля; $q_r = (p - p_{\text{вн}}) \Big|_{r=r_0+\frac{h}{2}}$ – зовнішнє навантаження

п'єзокерамічної оболонки, де p і $p_{\text{вн}}$ – гідродинамічні навантаження у зовнішньому і внутрішньому середовищах перетворювача ГПБА; ψ – електрична напруга.

Граничні умови задачі формулюються наступним чином. На плоскій морській границі, яка є акустично м'якою,

$$\Phi_{\Sigma} = 0 \text{ при } x = 0, \quad (4)$$

де Φ_{Σ} – потенціал швидкості повного звукового поля, дифрагovanого на системі «морська поверхня – ГПБА».

На п'єзокерамічній поверхні вакуумного перетворювача швидкість нормальних зміщень w точок поверхні перетворювача повинна бути рівною швидкості коливань середовищ, прилеглих до зовнішньої поверхні перетворювача

$$-\frac{\partial \Phi_{\Sigma}}{\partial r_1} = \frac{\partial w}{\partial t}, r_1 = r_0 + \frac{h}{2}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (5)$$

Електричні граничні умови задачі для п'єзокерамічного перетворювача довжиною, рівною одиниці, виберемо для режиму його холостого руху, коли струм зміщення в п'єзокераміці дорівнює нулю, у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_0^{2\pi} D r_1 d\varphi_1 dz_1 = 0. \quad (6)$$

Прийняті допущення дозволяють звести пошук рішення до розв'язку плоскої крайової задачі. Розв'язок сформульованої задачі будемо шукати методом зображень [2–4]. Його сутність полягає в тому, що шукане рішення будується з урахуванням введення в розгляд уявного п'єзокерамічного перетворювача (рис. 1). Таке введення накладається на основне рішення, завдяки чому задовольняються граничні умови задачі.

Виходячи із розрахункової моделі, наведеної на рис. 1, повне дифрагovanе поле ГПБА в присутності морської поверхні може бути записано у вигляді

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_0^{(1)} + \Phi_s^{(1)} + \Phi_0^{(2)} + \Phi_s^{(2)},$$

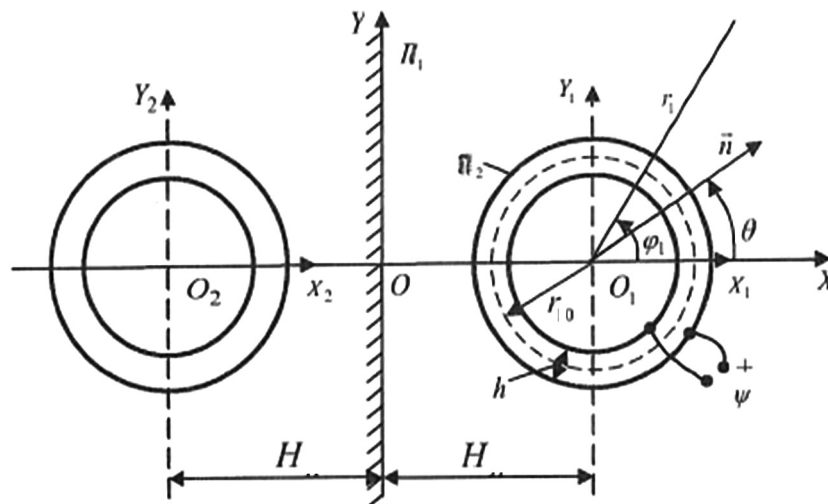


Рис. 1. Нормальний переріз системи тіл «морська поверхня – ГПБА» і введені системи координат

де $\Phi_0^{(1)}$ – плоска хвиля, що приходить із напрямку θ на досліджувану систему;

$\Phi_s^{(1)}$ – плоска хвиля, що відбилася б від плоскої границі розділу Π_1 при відсутності циліндричної поверхні Π_2 ;

$\Phi_0^{(2)}$ – хвиля, розсіяна п’єзокерамічним перетворювачем Π_2 при падінні на нього плоскої хвилі, що приходить;

$\Phi_s^{(2)}$ – хвиля, розсіяна перетворювачем Π_2 і відбита від морської поверхні Π_1 .

Запишемо всі поля в циліндричних координатах. Поле $\Phi_\Sigma^{(1)}$ має вигляд:

$$\Phi_\Sigma^{(1)} = \Phi_0^{(1)} + \Phi_s^{(1)} = \sum_n a_n \cdot J_n(kr_1) e^{in\varphi_1} + \sum_n b_n \cdot J_n(kr_2) e^{in\varphi_2}, \quad (7)$$

де $a_n = i^n e^{-in\theta}$ [4, 5], J_n – функція Бесселя.

Поле $\Phi_\Sigma^{(2)}$ визначається виразом:

$\Phi_\Sigma^{(2)} = \Phi_0^{(2)} + \Phi_s^{(2)}$ і повинно задовольняти умовам випромінювання на нескінченності:

$$\Phi_\Sigma^{(2)} = \sum_n A_n H_n^{(1)}(kr_1) e^{in\varphi_1} + \sum_n B_n H_n^{(1)}(kr_2) e^{in\varphi_2}, \quad (8)$$

де A_n і B_n – шукані коефіцієнти, $H_n^{(1)}$ – функція Ханкеля першого роду.

В задачі, що розглядається, повне дифрагване поле Φ_Σ повинно задовольняти граничній умові (4) на плоскій поверхні Π_1 . Використаємо результати робіт [2–4] для того, щоб у випадку акустичної м’якості морської поверхні Π_1 встановити зв’язок між коефіцієнтами у виразах (7) та (8). Згідно з цими роботами цей зв’язок має вигляд:

$$b_n = (-1)^{n+1} a_n; B_n = (-1)^{n+1} A_n. \quad (9)$$

Для того, щоб використати умови спряження звукових полів на криволінійній поверхні Π_2 , необхідно виразити всі звукові поля в локальних координатах перетворювача антени. Для цього використовуються теореми складання у вигляді:

$$J_m(kr_2) e^{im\varphi_2} = J_{m-n}(2kH_n) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} e^{in\varphi_1}; \quad (10)$$

$$H_m^{(1)}(kr_2) e^{im\varphi_2} = \sum_n H_{m-n}^{(1)}(2kH_n) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} e^{in\varphi_1},$$

де φ_2 – полярні координати центру φ_1 в системі координат з центром φ_2 .

Тоді з урахуванням виразів (9) і (10) звукові поля (7) і (8) з плоскою Π_1 і криволінійною Π_2 поверхнями, можливо виразити у вигляді:

$$\Phi_\Sigma^{(1)} = \sum_n a_n J_n(kr_1) e^{in\varphi_1} + \sum_m (-1)^{m+1} a_m \sum_n J_{m-n}(2kH_n) J_n(kr_1) \cdot e^{i(m-n)\varphi_{21}} \cdot e^{in\varphi_1}; \quad (11)$$

$$\Phi_\Sigma^{(2)} = \sum_n A_n H_n^{(1)}(kr_1) e^{in\varphi_1} + \sum_m (-1)^{m+1} A_m \sum_n H_{m-n}^{(1)}(2kH_n) J_n(kr_1) \cdot e^{i(m-n)\varphi_{21}} \cdot e^{in\varphi_1}.$$

Алгебраїзація функціонального рівняння (5), другого рівняння системи (2) та електричних граничних умов (6) на основі властивостей повноти і ортогональності сис-

тем функцій $e^{in\varphi_1}$ на інтервалі $[0, 2\pi]$ дозволяє отримати наступну систему нескінчених лінійних алгебраїчних рівнянь відносно шуканих коефіцієнтів розкладень w_n та A_n :

$$icw_n - A_n H_n^{(1)}(kr_1) - \sum_m (-1)^{m+1} A_{-m} H_{m-n}^{(1)}(2kH_n) J_n'(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} = a_n J_n'(kr_1) + \sum_m (-1)^{m+1} a_{-m} J_{m-n}(2kH) \times J_n'(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}}; n = -\infty, 0, \infty$$

$$w_n R_n + \frac{e_{31} r_1}{C_{11}^E} E_r + \frac{i\omega\alpha\rho}{h} A_n H_n^{(1)}(kr_1) + \frac{i\omega\alpha\rho}{h} \sum_m (-1)^{m+1} A_{-m} H_{m-n}^{(1)}(kH) \times J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} = -\frac{i\omega\alpha\rho}{h} a_n J_n(kr_1) - \frac{i\omega\alpha\rho}{h} \sum_m (-1)^{m+1} a_{-m} J_{m-n}(kH) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}}; n = -\infty, 0, \infty.$$

$$R_n = \frac{(n+n^2\beta)^2 - (1+\beta^4 - \omega^2\alpha\gamma)[(1+\beta)n^2 - \omega^2\alpha\gamma]}{(1+\beta)n^2 - \omega^2\alpha\gamma};$$

$$E_r = \frac{-e_{31}}{r_1 \varepsilon_{33}^s} \cdot w_0 = -\frac{\psi}{n}; w_0 - \text{амплітуда пульсуючих коливань перетворювача ГПБА.}$$

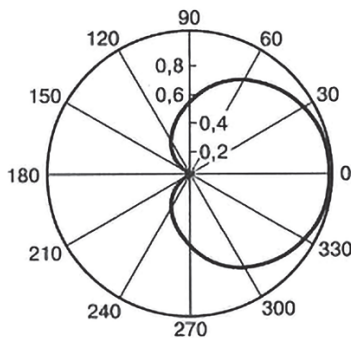
Система (12) після її перетворення відомими [5, 6] підходами до виду квазірегулярної може бути розрахована методом послідовних наближень або методом редукції. Рівняння (11) і (12) дозволяють визначити звукові поля ГПБА при буксируванні її в зоні впливу морської поверхні. Порівняння кількісних характеристик цих полів з такими ж характеристиками звукових полів при експлуатації ГПБА в глибоких морях, що не мають обмежуючих границь, дозволяє визначити ефективність ГАС з ГПБА при наявності впливу на неї морської поверхні.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В якості прикладу визначимо кількісні характеристики звукового поля перетворювача ГПБА в присутності морської поверхні в площинах, нормальних до повздовжньої осі антени. Виберемо робочу частоту ГПБА рівною $f = 20$ Гц. Для такої робочої частоти всі хвилювання морської поверхні зникають і вона являє собою плоску поверхню. Будемо рахувати, що ГПБА заглиблена від морської поверхні на глибину $H = 20$ м. Інші параметри ГПБА приймемо наступними. Перетворювач виготовлений із п’єзокераміки ЦТБС-3 з характеристиками: поляризація радіальна; густина $\gamma = 7210$ кг/м³; п’єзомодуль $d_{31} = 134 \cdot 10^{-12}$ К/Н; модуль пружності $C_{11}^E = 15,1 \cdot 10^{10}$ Н/м²; діелектрична проникливість $\varepsilon_{33}^s / \varepsilon_0 = 1280$; $e_{31} = d_{31} \cdot C_{33}^E$. Середній радіус п’єзокерамічного перетворювача приймався типовим для сучасних ГПБА і становив $r_0 = 0,009$ м при товщині $h = 0,001$ м. Внутрішній об’єм приймався вакуумованим $\rho_{вн} c_{вн} = 0$. Параметри зовнішнього середовища приймалися рівними $\rho = 103$ кг/м³; $c = 1,5 \cdot 10^6$ м/с. Кількість комплексних невідомих, які утримувались при розв’язку нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь (12),

становила 48. При цьому перевірка якості виконання граничних умов та умов спряження на границях областей показала, що нев'язка компонент поля не перевищує 1–5 %.

Результати розрахунків звукового поля ГПБА в присутності морської поверхні наведені на рис. 2 у вигляді характеристик спрямованості в площині, нормальній до поздовжньої осі ГПБА.



Р и с . 2. Характеристика спрямованості звукового поля системи тіл «морська поверхня – ГПБА» в площині, нормальній до поздовжньої осі ГПБА

Ця характеристика є однонаправленою в напрямі моря і має форму кардіоїди. Фізично це обумовлено наступним. Звукове поле ГПБА в присутності морської поверхні являє собою суперпозицію двох звукових полів – поля плоскої морської поверхні і поля ГПБА. Оскільки перше звукове поле є полем, відбитим від акустично «м'якої плоскої» поверхні, то воно відповідає умовам формування гідроакустичного диполя згідно з [5]. Друге звукове поле (поле ГПБА) відповідає умовам формування гідроакустичного пристрою монополя. А оскільки в областях інфразвукових і низьких звукових частот можна рахувати, що морська поверхня і ГПБА розміщені майже в одній площині, то їх сумісна робота і формує гідроакустичну характеристику спрямованості типу «кардіоїди» – $R(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2}$. Максимум її має-мо в напрямі приходу плоских хвиль ($\theta = 0$), а нульові приймання звукових хвиль – в протилежному напрямку ($\theta = \pi$), що представлено на рис. 1, 2.

ВИСНОВКИ

Підтверджено, що ГАС з ГПБА є ефективним засобом висвітлення підводної обстановки. Більшість ГАС з ГПБА працюють в області інфразвукових і низьких звукових частот, що обумовлює для таких частот обмежувальні границі у вигляді морської поверхні та морського дна.

З'ясовано їх вплив на роботу ГАС з ГПБА шляхом розв'язання задачі визначення впливу морської поверхні та морського дна окремо.

Також поставлена і розв'язана задача визначення впливу морської поверхні з використанням методу зображень шляхом формулювання розрахункової моделі системи тіл «морська поверхня – ГПБА».

Отримані аналітичні співвідношення, які описують звукові поля, що сформовані морською поверхнею, ГПБА і системою тіл «морська поверхня – ГПБА», шля-

хом розв'язку задачі методами послідовних наближень або редукції нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Застосування отриманих рішень по звукових полях системи тіл «морська поверхня – ГПБА» підтверджено при розрахунку звукових полів розглянутої системи на частоті 20 Гц, з наведенням фізичного обґрунтування отриманих результатів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дерепя А.В., Лейко А.Г., Меленко Ю.Я. Основы военно-технических исследований. Т. 8. Комплексная система «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Проблемные аспекты системы «гидроакустическая станция – надводный корабль» с антеннами переменной глубины: монография. Киев: Изд. дом Д. Бурого. 2016. 400 с.
2. Гузь О.М., Головчан В.Т. Дифракция пружных хвиль в багатозв'язаних тілах: монография. Київ: Наук. думка. 1972. 254 с.
3. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Бабаев А.Е. Гидроупругость систем оболочек: монография. Киев: Высш. школа. 1984. 208 с.
4. Кубенко В., Янчевський І. Дифракция акустических хвиль на системах неоднотипных тіл: монография. Київ: НТУ «Київський політехнічний інст. імені Ігоря Сікорського». 2024. 266 с.
5. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики: монография. Київ: Наукова думка. 2007. 640 с.
6. Гринченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Волновые задачи акустики: монография. Киев: Интерсервис. 2013. 579 с.

REFERENCES

1. Derepa, A.V., Leiko, A.G. & Melenko, Yu.Ya. (2016), “Kompleksnaia sistema «gidroakusticheskoe vooruzhenie – nadvodnyi korabl». Problemye aspekty sistemy «gidroakusticheskaia stantsiia – nadvodnyi korabl» z antennami peremennoi glubiny” [Integrated system «hydroacoustic armament – surface ship». Problematic aspects of the system «hydroacoustic station – surface ship» with antennas of variable depth]. K.: D. Buraho Publ. house. 400 p.
2. Huz, O.M. & Holovchan, V.T. (1972), “Dyfraktsiia pruzhnykh khvyl v bahatozviiazanykh tilakh” [Diffraction of elastic waves in multi-bonded bodies]. K.: Nauk. dumka. 254 p.
3. Huz, A.N., Kubenko, V.D. & Babaev, A.E. (1984) “Hydrouprugost system obolochek” [Hydroelasticity of shell systems]. K.: Vyssh. shkola. 208 p.
4. Kubenko, V. & Yanchevskiy, I. (2024) “Dyfraktsiia akustychnykh khvyl na systemakh neodnotypanykh til” [Diffraction of acoustic waves on systems of heterogeneous bodies]. K.: NTU «Kyivskyi politekhnichniy inst. im. Igora Sikorskogo». 266 p.
5. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsipura, V.T. (2007). “Osnovy akustiky: monografia” [Fundamentals of Acoustics: monograph]. K.: Naukova Dumka. 640 p.
6. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsipura, V.T. (2013). “Volnovye zadachi akustiki: monografia” [Wave Problems in Acoustics: Monograph]. K.: Interservice. 579 p.

**Leiko O.G., Hamalii N.V., Pozdniakova O.M.,
Averichev I.V.**

**SOUND FIELDS OF HYDROACOUSTIC
STATIONS WITH FLEXIBLE EXTENDED
TOWED ANTENNAS IN THE PRESENCE
OF THE SEA SURFACE**

The effectiveness of using hydroacoustic station with flexible extended towed antennas to illuminate the underwater environment largely depends on the presence of limiting boundaries in operating conditions. This is due to the fact that hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas usually operate in the range of infrasonic and low sound frequencies. For them, all seas are limited either by the sea surface or the seabed. The problem of determining the sound fields that form hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in the presence of a limiting boundary in the form of the sea surface is considered. Using the image method, a computational model of the «sea surface-flexible extended towed antennas» body system is formulated. Analytical relations describing the sound fields formed by the sea surface, the flexible extended towed antennas and the «sea surface- flexible extended towed antennas» body system are obtained using the methods of the theory of electrohydroelasticity. Quantitative data for sound fields in the range of infrasonic frequencies are given as an example of the application of the obtained relations. It is shown that the directivity characteristic of the flexible extended towed antennas in the presence of the sea surface has the shape of a cardioid. The physical justification of the obtained results is given. The obtained materials allow us to compare the effectiveness of the use of hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in deep seas and seas where there is an influence of the sea surface on hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas.

Keywords: sound fields, flexible extended towed antenna, sea surface.

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://orcid.org/0000-0002-5588-6449>
e-mail: Alexander_leiko@ukr.net

Гамалій Наталія Вікторівна

старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння

та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>

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

Аверічев Ілля Володимирович

начальник науково-дослідного відділу
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та
військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0005-3855-9701>

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

Hamalii Nataliia

Senior Researcher
Central Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>

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

Averichev Ilya

Head of Research Department
Central Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0005-3855-9701>

Стаття надійшла до редколегії 23.01.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.

Стаття опублікована 30.03.2026.

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.

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 № 2 від 13.02.2026)

Підписано до друку 30.03.2026

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. 2 of 13.02.26)

Signed for print on 30.03.2026

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.