

ПОВІТРЯНА МІЦЬ УКРАЇНИ

№ 2 (9)
2025

Науково-практичний журнал

В номері:

Засновник і видавець
Національний університет
оборони України
Журнал заснований
у 2021 році

Адреса редакції
Національний університет
оборони України
Інститут авіації
та протиповітряної оборони
проспект Повітряних Сил, 28,
Київ, 03049
телефон: (044)-271-05-88,
(050)-981-49-83
e-mail: iapbo.ndl@gmail.com
електронна версія журналу:
sarp.nuou.org.ua

Журнал зареєстровано в
Міністерстві юстиції України
(Свідоцтво
КВ № 24979-14919Р)
ідентифікатор медіа
у Ресурсі суб'єктів
у сфері медіа – R30-01154
ISSN 2786-7714
(друкованого видання),
ISSN 2786-7722
(електронного видання)

Журнал включений до
переліку наукових фахових
видань України, в яких
можуть публікуватися
результати дисертаційних
робіт на здобуття наукових
ступенів доктора наук,
кандидата наук та ступеня
доктора філософії (Наказ
Міністерства освіти і науки
України № 220 від 21.02.2024
"Про затвердження рішень
атестаційної колегії
Міністерства освіти і науки
України від 21.02.2024")

Галузі науки: технічні,
військові.
Тематична спрямованість
науково-практичного журналу
відповідає таким
спеціальностям:
122 Комп'ютерні науки;
253 Військове управління (за
видами збройних сил);
255 озброєння та військова
техніка;
263 Цивільна безпека.

Журнал видається змішаними
мовами
(українською та англійською)
та виходить 2 рази на рік

Рекомендовано до друку
Вченою радою Національного
університету оборони України
(протокол № 14 від
24 листопада 2025 року)

При використанні матеріалів
посилання на журнал
"Повітряна міць України"
обов'язкове

Редакція може не поділяти
точку зору авторів.
Відповідальність за зміст
поданих матеріалів несуть
автори

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОВІТРЯНИХ СИЛ УКРАЇНИ, УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	5
Живучість угруповання зенітних ракетних військ в сучасних операціях (бойових діях): система поглядів, сутність та визначення (Власенко Є.В., Горобець Ю.О., Титаренко О.Б., Щипанський П.В.)	5
Фактори, що впливають на ефективність управління угрупованням радіотехнічних військ в оборонній операції оперативного угруповання військ (сил) (Пуховий О.В., Щипанський П.В., Ясинецький В.П., Кресан С.В.)	15
ПИТАННЯ БОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН ТА ПІДРОЗДІЛІВ ДЕРЖАВНОЇ АВІАЦІЇ УКРАЇНИ, ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ, РАДІОТЕХНІЧНИХ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК, ЗВ'ЯЗКУ, РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ	20
Стратегія вибору маршруту польоту авіації при моделюванні планування подолання ППО противника на основі застосування клітинного автомата (Ткаченко А.В.)	20
Удосконалена методика обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ (Новіков О.В., Глоба О.В.)	26
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ	33
Методика оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття від дій повітряного противника (Степанов Г.С., Опенько П.В., Доска О.М., Різніченко Е.А.)	33
ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ	41
Обґрунтування шляхів реалізації перспективних напрямів розвитку автономних систем (зразків) озброєння і військової техніки зенітних ракетних військ Повітряних Сил (Кошка В.О., Гришук В.В., Биховець В.М., Сальник О.В.)	41
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПЛІТОВАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ	48
Математична модель застосування рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей (Шовкошитний І.І., Василенко О.А.)	48
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ПІД ЧАС ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН ТА ПІДРОЗДІЛІВ ПОВІТРЯНИХ СИЛ, СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК, ВІЙСЬКОВО-МОРСЬКИХ СИЛ, ДЕСАНТНО-ШТУРМОВИХ ВІЙСЬК ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ ТА ІНШИХ ВІЙСЬКОВИХ ФОРМУВАНЬ	57
Перспективи застосування теорії конфліктів для організації взаємодії сил і засобів протиповітряної оборони (Резнік Д.В., Патахала В.Г., Шкурат Б.Ж., Глоба О.В.)	57
ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ	64
Альтернативні джерела електричної енергії в контексті їх використання в частинах Повітряних Сил Збройних Сил України (Курочкін В.В., Іванов В.І., Целіщев Ю.П.)	64
Обґрунтування підходів до визначення необхідного обсягу технічного обслуговування радіоелектронної техніки в умовах обмеженого часу на його проведення під час бойового застосування радіотехнічних військ (Попов С.Е., Юфа Є.А., Бондар В.В.)	71
Удосконалена методика комплексного оцінювання ефективності ремонту озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ (Шкурат Б.Ж., Громоший І.Б., Дранник П.А.)	78
Комбінований підхід до оптимізації забезпечення засобами ураження підрозділів протиповітряної оборони (Саничев М.М., Шкурат Б.Ж., Резнік Д.В., Мильников Г.В.)	87
ПИТАННЯ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН (ПІДРОЗДІЛІВ) ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ	96
Комплексне ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд України за рівнем безпеки (Гавриш А.П., Філіппова В.В.)	96
Підходи до оцінювання ефективності експлуатації систем пожежної сигналізації та оповіщення на об'єктах зберігання авіаційних засобів ураження (Авраменко О.В., Саранін Ю.О., Яблонський П.М., Федоров О.В.)	108
ДОСВІД ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ОПЕРАЦІЙ (АНТИТЕРОРИСТИЧНИХ, МИРОТВОРЧИХ, СИЛ ОБОРОНИ)	115
Революційний вплив безпілотних авіаційних систем на сучасну війну: аналіз стратегічних та тактичних інновацій України (Мартинюк О.Р., Радько О.В., Гончаренко Є.В.)	115
ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНИКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	123
Сучасні методи навігації безпілотних літальних апаратів (Мальований В.В., Журід В.І., Капінос М.С., Яковлев Р.П.)	123
Планування та виконання польотів БпЛА в умовах змінного операційного середовища (Тягній В.Г., Журід В.І., Васін І.І., Яковлев Р.П.)	133
Методика енергетичного аналізу похибки відновлення та встановлення кількісних критеріїв вибору методу інтерполяції залежно від нормалізованої частоти дискретизації (Матвеев В.В., Стуцанський Ю.В., Волканін Є.Є., Мальований В.В.)	145
Вимоги до оформлення наукових статей	150

Редакційна колегія

Головний редактор

КРАВЧЕНКО Юрій Васильович
доктор технічних наук, професор
ORCID: [0000-0002-0281-4396](https://orcid.org/0000-0002-0281-4396)

Заступник головного редактора

КОРОТІН Сергій Михайлович
кандидат технічних наук, доцент
ORCID: [0000-0003-2123-6103](https://orcid.org/0000-0003-2123-6103)

Члени редколегії:

АВРАМЕНКО Олександр Васильович
доктор технічних наук, доцент
ORCID: [0000-0003-1358-1185](https://orcid.org/0000-0003-1358-1185)

ГАВРИЛКО Євген Володимирович
доктор технічних наук, професор
ORCID: [0000-0001-9437-3964](https://orcid.org/0000-0001-9437-3964)

ЗЕМЛЯНСЬКИЙ Олег Миколайович
доктор технічних наук, доцент
ORCID: [0000-0002-2728-6972](https://orcid.org/0000-0002-2728-6972)

КУРТСЕЙТОВ Тимур Ленурович
доктор технічних наук, професор
ORCID: [0000-0001-6478-6469](https://orcid.org/0000-0001-6478-6469)

ЛОБОЙЧЕНКО Валентина Михайлівна
доктор технічних наук
ORCID: [0000-0001-5188-6479](https://orcid.org/0000-0001-5188-6479)

МУРАСОВ Рустам Камілович
доктор технічних наук, професор
ORCID: [0000-0003-0800-2062](https://orcid.org/0000-0003-0800-2062)

ОПЕНЬКО Павло Вікторович
кандидат технічних наук, старший дослідник
ORCID: [0000-0001-7777-5101](https://orcid.org/0000-0001-7777-5101)

ТИЩЕНКО Максим Георгійович
кандидат технічних наук, старший дослідник
ORCID: [0000-0003-1266-4106](https://orcid.org/0000-0003-1266-4106)

САЛІЙ Анатолій Григорович
кандидат військових наук, професор
ORCID: [0000-0002-3491-9301](https://orcid.org/0000-0002-3491-9301)

ГЕРАСИМЕНКО Володимир Вікторович
доктор військових наук
ORCID: [0000-0003-2014-7408](https://orcid.org/0000-0003-2014-7408)

СЛІВА Здзіслав
габілітований доктор
ORCID: [0000-0002-5653-2941](https://orcid.org/0000-0002-5653-2941)

БАЗІЛО Сергій Михайлович
доктор філософії
ORCID: [0000-0002-1597-3724](https://orcid.org/0000-0002-1597-3724)

КОЛОМІЄЦЬ Юрій Миколайович
доктор філософії
ORCID: [0000-0002-9767-0750](https://orcid.org/0000-0002-9767-0750)

МАРТИНЮК Олексій Ростиславович
кандидат технічних наук, доцент
ORCID: [0000-0003-2578-0018](https://orcid.org/0000-0003-2578-0018)

МИРОНЮК Микола Юрійович
кандидат військових наук,
старший дослідник
ORCID: [0000-0002-7164-2700](https://orcid.org/0000-0002-7164-2700)

РЄЗНІК Дмитро Вікторович
кандидат військових наук, доцент
ORCID: [0000-0003-3980-923X](https://orcid.org/0000-0003-3980-923X)

Технічний редактор

МАЙСТРОВ Олексій Олексійович
кандидат технічних наук, доцент
ORCID: [0000-0002-9054-8293](https://orcid.org/0000-0002-9054-8293)

AIR POWER OF UKRAINE

№ 2 (9)
2025

Scientific and Practical Journal

Contents:

Founder and publisher
National Defence
University of Ukraine
The journal was founded
in 2021

Address
National Defence
University of Ukraine,
Aviation and Air Defence
Institute
ave. Povitrynykh Syl, 28, Kyiv,
03049
Telephone: (044)-271-05-88,
(050)-981-49-83
e-mail: iappo.ndl@gmail.com
on-line version of journal:
sap.nuou.org.ua

The journal is registered in the
Ministry of Justice of Ukraine
(certificate
KB № 24979-14919P)
the media identifier
in the Register
of Media Entities is **R30-01154**
ISSN 2786-7714 (print),
ISSN 2786-7722 (online)

The journal is included in the
list of specialized scientific
publications of Ukraine, in
which the results of dissertations
for obtaining the scientific
degrees of Doctor of Science,
Candidate of Science and Doctor
of Philosophy can be published
(Order of the Ministry of
Education and Science of
Ukraine No. 220 of 21.02.2024
"On approval of the decisions of
the attestation board of the
Ministry of Education and
Sciences of Ukraine
from February 21, 2024")

Branches of science: technical,
military.
The thematic orientation of the
scientific and practical journal
corresponds to the following
specialties:
122 Computer science;
253 Military administration (by
types of armed forces);
255 Armament and military
equipment;
263 Civil security.

The journal is published in
Ukrainian and English
twice a year

Recommended for publication
by the Scientific Council
of the National Defence
University of Ukraine
(protocol № 14 from
November, 24, 2025)

When using materials reference
to the journal
"Air Power of Ukraine" is
obligatory

The editorial board can have a
different viewpoint
than that of the authors.
The content of the materials is
the authors' responsibility

THE UKRAINIAN AIR FORCES DEVELOPMENT, APPLICATION AND PROVISION ISSUES, IMPROVEMENT OF THEIR COMMAND AND CONTROL SYSTEMS	
Survivability of The Anti-Aircraft Missile Forces Group in Modern Operations (Combat): System of Views, Essence and Definition (Y. Vlasenko, Y. Horobets, O. Tytarenko, P. Shchypanskyi)	5
Factors Affecting the Management Efficiency of Radiotechnical Troops in the Defensive Operation of the Operational Group of Troops (Forces) (O. Pukhovy, P. Shchypanskyi, V. Yasynetskyi, S. Kresan)	15
THE STATE AVIATION OF UKRAINE, ANTI-AIRCRAFT, RADIO TECHNICAL AND SPECIAL TROOPS, RADIO ENGINEERING SUPPORT AND COMMUNICATION MILITARY UNITS COMBAT USE	20
A Strategy for Selecting Aviation Flight Routes for Overcoming Enemy Air Defenses Based on Cellular Automaton Modeling (A. Tkachenko)	20
Recommendations for the Weapons and Military Techniques Recovery Efficiency Improving for Anti-Aircraft Missile Forces (O. Novikov, O. Hloba)	26
THE UKRAINIAN AIR FORCES BRANCH OF FORCES AND SPECIAL FORCES APPLICATION PROCESSES MODELING	33
Methodology for Assessing the Level of Threat to Covered Objects From Air Enemy Actions (H. Stepanov, P. Openko, O. Doska, E. Riznichenko)	33
THE AIR ATTACK MEANS PROSPECTIVE DEVELOPMENT ISSUES	41
Justification of the Implementation Paths for Promising Directions of Development of Autonomous Weapon Systems And Military Equipment of the Air Defense Missile Forces of the Air Forces of Ukraine (V. Koshka, V. Gryniuk, V. Bykhovets, O. Sahnyk)	41
THE MANNED AND UNMANNED AVIATION COMMAND AND CONTROL AND APPLICATION PROCESSES RESEARCH	48
Mathematical Model of the Use of a Swarm of Strike Unmanned Aerial Vehicles to Engage Non-Stationary Group Targets Using Elements of Artificial Intelligence (I. Shovkoshytnyi, O. Vasylenko)	48
THEORETICAL BASIS OF INTERACTION DURING THE APPLICATION OF MILITARY UNITS AND SUB-UNITS OF THE AIR FORCE, LAND FORCES, NAVAL FORCES, AIR ASSAULT FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE AND OTHER MILITARY FORMATIONS	57
Prospects for the Application Conflict Theory to the Organization of Air Defense Forces and Assets Interaction (D. Rieznik, V. Patalakha, O. Hloba, B. Shkurat)	57
THE UKRAINIAN AIR FORCES BRANCHES LOGISTIC SUPPORT DEVELOPMENT ISSUES	64
Alternative Sources of Electric Energy in the Context of Their Use in the Units of the Air Force of Ukraine (V. Kurochkin, V. Ivanov, Y. Tselitshev)	64
Justification of Approaches to Determining the Required Level of Technical Maintenance of Radio-Electronic Equipment in the Conditions of Limited Time for its Implementation Conduct During the Combat Use of Radio-Technical Troops (S. Popov, Y. Yufa, V. Bondar)	71
Improved Methodology for Comprehensive Assessment of the Effectiveness of Armament and Military Equipment Repair in Anti-Aircraft Missile Forces (I. Hromovyi, B. Shkurat, P. Drannyk)	78
A Combined Approach to Optimizing the Provision of Munitions for Air Defence Units (M. Sapichev, B. Shkurat, D. Rieznik, H. Mylnikov)	87
ISSUES CONCERNING THE PREVENTION OF TERRORIST AND MAN-MADE (TECHNOGENIC) EMERGENCIES RELATED TO THE ACTIVITIES OF UKRAINIAN AIR FORCES MILITARY UNITS (SUB-UNITS)	96
Integrated Ranking of Energy and Hydraulic Structures of Ukraine Based on the Hazard Index (A. Havrys, V. Filippova)	96
Approaches to Assessing the Efficiency of Operation of Fire Alarm and Notification Systems at Aviation Equipment Storage Facilities (O. Avramenko, Y. Sarapin, P. Yablonskyi, O. Fedorov)	108
EXPERIENCE IN CONDUCTING OPERATIONS (COUNTER-TERRORST, PEACEKEEPING, DEFENCE FORCES)	115
The Revolutionary Impact of Unmanned Aerial Systems On Modern Warfare: an Analysis of Ukrainian Strategic and Tactical Innovations (O. Martyniuk, O. Radko, Y. Honcharenko)	115
INNOVATIVE PROCESSES IN FIELDS OF AVIATION, AUTOMOTIVE, RADIO ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING, COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS, AS WELL AS INFORMATION TECHNOLOGIES	123
Modern Methods of Navigation for Unmanned Aerial Vehicles (V. Malovanyi, V. Zhurid, M. Kapinos, R. Yakovliev)	123
Mission Planning and Execution of UAV Flights in a Dynamic Operational Environment (V. Malovanyi, V. Zhurid, I. Vasin, R. Yakovliev)	133
Methodology of Energy Analysis of Recovery Errors and Establishment of Quantitative Criteria for Choosing the Interpolation Method Depending on the Normalized Sampling Frequency (V. Matvieiev, Y. Stushchansky, E. Volkanin, V. Maliovany)	145
Paper Template	150

Editorial Board

Chief Editor

Yurii KRAVCHENKO

Doctor of Technical Sciences, professor

ORCID: [0000-0002-0281-4396](https://orcid.org/0000-0002-0281-4396)

Deputy Editor

Serhii KOROTIN

Candidate of Technical Sciences, associate professor

ORCID: [0000-0003-2123-6103](https://orcid.org/0000-0003-2123-6103)

Editorial Board Members:

Oleksandr AVRAMENKO

Doctor of Technical Sciences, associate professor

ORCID: [0000-0003-1358-1185](https://orcid.org/0000-0003-1358-1185)

Yevhen HAVRYLKO

Doctor of Technical Sciences, professor

ORCID: [0000-0001-9437-3964](https://orcid.org/0000-0001-9437-3964)

Oleh ZEMLIANSKYI

Doctor of Technical Sciences, associate professor

ORCID: [0000-0002-2728-6972](https://orcid.org/0000-0002-2728-6972)

Tymur KURTSEITOV

Doctor of Technical Sciences, professor

ORCID: [0000-0001-6478-6469](https://orcid.org/0000-0001-6478-6469)

Valentyna LOBOICHENKO

Doctor of Technical Sciences

ORCID: [0000-0001-5188-6479](https://orcid.org/0000-0001-5188-6479)

Rustam MURASOV

Doctor of Technical Sciences, professor

ORCID: [0000-0003-0800-2062](https://orcid.org/0000-0003-0800-2062)

Pavlo OPENKO

Candidate of Technical Sciences, senior researcher

ORCID: [0000-0001-7777-5101](https://orcid.org/0000-0001-7777-5101)

Maksym TYSHCHENKO

Candidate of Technical Sciences, senior researcher

ORCID: [0000-0003-1266-4106](https://orcid.org/0000-0003-1266-4106)

Anatolii SALII

Candidate of Military Sciences, professor

ORCID: [0000-0002-3491-9301](https://orcid.org/0000-0002-3491-9301)

Volodymyr HERASIMENKO

Doctor of Military Sciences

ORCID: [0000-0003-2014-7408](https://orcid.org/0000-0003-2014-7408)

Zdzisław SLIWA

Doctor of science (Hab.)

ORCID: [0000-0002-5653-2941](https://orcid.org/0000-0002-5653-2941)

Serhii BAZILO

PhD in Military Science

ORCID: [0000-0002-1597-3724](https://orcid.org/0000-0002-1597-3724)

Yurii KOLOMIETS

PhD in Technical Science

ORCID: [0000-0002-9767-0750](https://orcid.org/0000-0002-9767-0750)

Oleksii MARTYNIUK

Candidate of Technical Sciences, associate professor

ORCID: [0000-0003-2578-0018](https://orcid.org/0000-0003-2578-0018)

Mykola MIRONYUK

Candidate of military sciences, senior researcher

ORCID: [0000-0002-7164-2700](https://orcid.org/0000-0002-7164-2700)

Dmytro RIEZNIK

Candidate of Military Sciences, associate professor

ORCID: [0000-0003-3980-923X](https://orcid.org/0000-0003-3980-923X)

Technical Editor

Oleksiy MAYSTROV

Candidate of Technical Sciences, associate professor

ORCID: [0000-0002-9054-8293](https://orcid.org/0000-0002-9054-8293)

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ, УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-5-14

УДК 355.01:355.5:355.457.2:355.45:355.48

Власенко Євген Валерійович

<https://orcid.org/0009-0005-6376-6104>

Горобець Юрій Олексійович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-7994-2022>

Титаренко Олександр Борисович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-3992-9314>

Щипанський Павло Володимирович (кандидат військових наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0002-0854-733X>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ЖИВУЧІСТЬ УГРУПОВАННЯ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК В СУЧАСНИХ ОПЕРАЦІЯХ (БОЙОВИХ ДІЯХ): СИСТЕМА ПОГЛЯДІВ, СУТНІСТЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

У статті проведено аналіз існуючих підходів до визначення живучості угруповань зенітних ракетних військ. Встановлено, що традиційні підходи, які фокусуються на окремих тактичних заходах або математичному моделюванні виживання окремих елементів, не в повній мірі відповідають викликам сучасної війни, зокрема протидії розвідувально-ударним системам на базі безпілотних літальних апаратів. Виявлено невирішене завдання, яке полягає в удосконаленні існуючої концептуальної моделі, яка б системно інтегрувала різні аспекти живучості. Методами системного та порівняльного аналізу, а також декомпозиції та синтезу на основі вивчення досвіду бойових дій в російсько-українській війні, вітчизняних наукових праць та закордонних доктринальних документів розроблено новий системний підхід. У результаті запропоновано чотирикомпонентну концептуальну модель живучості, що включає прихованість, стійкість, відновлюваність та адаптивність. На основі цієї моделі сформульовано нове, комплексне визначення живучості угруповання зенітних ракетних військ як його інтегративної, емерджентної властивості. Доведено, що запропонований підхід є адекватною відповіддю на загрози в сучасному багатодоменому операційному середовищі та дозволяє більш обґрунтовано розробляти комплексні заходи з підвищення бойового потенціалу військ.

Ключові слова: живучість, показники живучості, зенітні ракетні війська, ефективність, системний підхід, концептуальна модель, російсько-українська війна, багатодоменні операції, бойовий потенціал, управління, планування, угруповання військ, засоби розвідки, моделювання, безпілотні літальні апарати.

Вступ

Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України стала каталізатором фундаментальних змін у поглядах на сучасні збройні конфлікти, особливо в частині протидії високотехнологічним засобам повітряного нападу (ЗПН) [1]. Досвід бойових дій продемонстрував, що успіх оборонних операцій критично залежить від стійкості та ефективності системи протиповітряної оборони, ядром якої є зенітні ракетні війська (ЗРВ) [2]. Водночас противник активно застосовує комплексну тактику “розвідувально-ударних контурів”, поєднуючи засоби космічної, радіотехнічної та безпіотної розвідки з масованими ударами крилатими ракетами, баражуючими боеприпасами та іншими видами високоточної зброї [3, 4]. Це створює безпрецедентний тиск на підрозділи ЗРВ і виявляє ключову проблему, що полягає у невідповідності

класичних підходів до розуміння їхньої живучості сучасним реаліям.

Проблема забезпечення живучості військових формувань є постійним об’єктом уваги військової науки. Закордонні доктринальні підходи, зокрема армії США, традиційно розглядають живучість (Survivability Operations) через призму тактичних заходів: укриття, маскування, камуфляж та введення в оману (модель C³D) [5]. Однак навіть у цих доктринах визнається їхня фрагментарність та значний дисбаланс у бік “укриття” на шкоду іншим компонентам [5]. Цю ідею розвивають польові статuti, такі як FM 3-0 (Операції) [6] та FM 3-01 (Операції ППО) [7], які інтегрують заходи живучості в загальний контекст бойових дій, наголошуючи на важливості розосередження, мобільності та введення противника в оману. Теоретичні роботи, як-от праця Р.Сміта, пропонують більш формалізовані, ієрархічні

визначення живучості, розглядаючи її як системну властивість [8].

Сучасні праці українських військових науковців пропонують потужний математичний апарат для кількісної оцінки живучості, використовуючи теорію ймовірностей та марковські випадкові процеси для моделювання бойових дій та розрахунку показників живучості окремих елементів [9-12]. Водночас, ці методики часто є складними для оперативного застосування та не завжди враховують усю сукупність організаційно-технічних факторів [13-15]. Паралельно розглядаються системні аспекти живучості, зокрема стійкість системи пунктів управління [16, 17] та логістики [18]. Новітні концепції, такі як багатодоменні операції (MDO) [19-21], вимагають перегляду підходів до живучості, оскільки загрози стають комплексними.

Проведений аналіз виявляє наукову суперечність. З одного боку, існує велика кількість методик для оцінки окремих аспектів живучості. З іншого боку, відсутній єдиний системний підхід до визначення поняття “живучість угруповання зенітних ракетних військ”, який би інтегрував тактичні заходи, математичне моделювання та організаційні аспекти в єдину концептуальну модель, адаптовану до викликів сучасної багатодоменної війни.

Мета статті – обґрунтування нового системного підходу до визначення поняття “живучість угруповання зенітних ракетних військ”, який розглядає живучість як інтегративну, багатокомпонентну властивість.

Матеріали та методи

Це дослідження має теоретичний характер і ґрунтується на комплексному аналізі та синтезі існуючих наукових праць, доктринальних документів та досвіду бойових дій. Інформаційною основою слугували наукові праці українських військових вчених [3, 4, 9-22], закордонні доктринальні та концептуальні документи [5-8, 23-28], бойовий статут СВ ЗС України [29] та аналітичні матеріали щодо характеру сучасних бойових дій [1, 2, 4, 13, 15, 30, 31]. В основі дослідження лежить комплексний підхід, що поєднує методи системного, порівняльного, концептуального аналізу та синтезу. Дослідження базується на ключовому припущенні, що в умовах сучасної “прозорості” поля бою, живучість угруповання визначається не стільки його здатністю витримати удар, скільки здатністю уникнути виявлення та ураження, а також швидко відновити боєздатність.

Результати

Для повного розуміння актуальності проблеми доцільно розглянути, як поняття “живучість” еволюціонувало у військовій теорії та практиці. Цей розвиток можна умовно поділити на три етапи, кожен з яких був відповіддю на нові технологічні та тактичні виклики.

Етап 1: Епоха фізичного захисту (до середини XX ст.). На цьому етапі живучість переважно

ототожнювалася з фізичною захищеністю та здатністю витримати вогневий вплив противника. Філософію цього періоду влучно характеризує вислів Вінстона Черчилля: “Нехай нападник атакує. Нехай він дізнається, що кулі вбивають людей, а земля зупиняє кулі” [5]. Основний принцип цього періоду можна сформулювати як “витримати удар”.

Цей підхід не був суто теоретичним, а народжувався безпосередньо з бойового досвіду. Як зазначає у своєму дослідженні Дж. Смолфілд, вже під час Громадянської війни в США (1863-1864 рр.) солдати обох армій усвідомили вирішальну цінність тимчасових польових укріплень. Командир однієї з дивізій зазначав, що “серед солдатів стало визнаним фактом, що якщо противник займав позицію на шість-вісім годин раніше за нас, намагатися її взяти було марно” [5].

Апогею ця концепція досягла під час Першої світової війни, яка перетворила живучість на екстремальну форму позиційної оборони. Саме тоді у військовий лексикон увійшли такі терміни, як “бомбосховище” (bombproof), “сапа” (sap) та “траверс” (traverse), що позначали елементи складної системи окопів та укріплень, призначених для максимального захисту особового складу від артилерійського вогню та куль [5].

Головними заходами цього періоду були:

фортифікаційне обладнання позицій: спорудження окопів повного профілю, бліндажів, перекритих щілин та інших захисних споруд для захисту особового складу та вогневих засобів.

фізичне зміцнення техніки та об'єктів: використання бронювання, дублювання та резервування ключових вузлів, як це було реалізовано в ранніх зразках військової техніки [10].

Таким чином, на першому етапі свого розвитку живучість розглядалася переважно як пасивна, статична властивість. Основні зусилля були спрямовані на створення фізичних перешкод, здатних поглинути або нейтралізувати кінетичну енергію засобів ураження противника. Цей підхід заклав основи інженерного забезпечення, багато принципів якого, зокрема щодо фортифікаційного обладнання районів розміщення військ, залишаються актуальними і сьогодні [29].

Етап 2: Епоха уникнення виявлення (період “Холодної війни”). З розвитком засобів розвідки (аеро- та космічної), а також з появою високоточної зброї у другій половині XX ст. стало очевидним, що одного лише фізичного захисту недостатньо. Будь-яке, навіть найнадійніше, укріплення могло бути знищене точним влучанням потужного боеприпасу. Це змусило військову теорію зробити наступний крок: якщо удар неможливо витримати, його потрібно уникнути. Так розпочався етап, основний принцип якого можна сформулювати як “не бути виявленим”.

У цей період у доктрині збройних сил США та інших країн-членів НАТО формується комплексна концепція, відома як C³D (Cover, Concealment, Camouflage, Deception – Укриття, Маскування, Камуфляж, Введення в оману) [5]. Акцент

зміщується з суто пасивного захисту на активні заходи, спрямовані на унеможливлення або ускладнення виявлення та ідентифікації своїх військ противником. Кожен елемент цієї концепції відігравав свою унікальну роль:

1) Укриття (Cover): залишалося важливим елементом, але тепер розглядалося не як самоціль, а як останній рубіж захисту на випадок, якщо інші заходи не спрацювали. Воно передбачало захист від вогню та уламків [5].

2) Маскування (Concealment): визначалося як захист від спостереження противника [5]. Це включало використання природних укриттів (ліси, рельєф місцевості) та штучних засобів (маскувальні сітки) для приховування позицій, техніки та особового складу від візуальної, теплової та радіолокаційної розвідки [29].

3) Камуфляж (Camouflage): розумівся як використання матеріалів та методів для того, щоб злитися з навколишнім середовищем, зробити об'єкт менш помітним [5].

4) Введення в оману (Desertion): стало одним із ключових елементів активної протидії розвідці. Він передбачав створення хибних позицій, використання надувних макетів техніки, імітаторів теплового та радіолокаційного випромінювання, а також проведення демонстративних дій з метою введення противника в оману щодо реального розташування та намірів своїх військ [5].

Таким чином, живучість перестала бути суто інженерним завданням і перетворилася на комплексну оперативно-тактичну дисципліну. Вона вимагала не лише будівництва укріплень, а й глибокого розуміння можливостей засобів розвідки противника та постійного застосування заходів для протидії їм. Цей підхід був закріплений у керівних документах, таких як польові статuti FM 3-0 "Операції" та FM 3-90 "Тактика", де вимоги щодо розосередження, маскування та введення противника в оману стали невід'ємною частиною планування будь-якої бойової операції [6, 23].

Етап 3: Епоха системної та динамічної живучості (сучасні конфлікти). Досвід останніх збройних конфліктів, і особливо російсько-української війни, продемонстрував [13, 15, 31], що в умовах "прозорого" поля бою, насиченого безпілотними літальними апаратами (БПЛА), космічними засобами розвідки та розгалуженими сенсорними мережами, ані пасивний захист, ані лише прихованість не гарантують виживання [2]. Здатність противника створювати щільні розвідувально-ударні контури, де час від моменту виявлення цілі до її вогневого ураження скорочується до хвилин, докорінно змінює саму природу загроз [21].

В цих умовах на перший план виходить здатність усієї військової системи до динамічних дій. Живучість перестає бути властивістю окремого зразка ОВТ і починає розглядатися як комплексна, емерджентна властивість угруповання, що включає не лише бойові елементи, а й критично важливі підсистеми управління [16, 17] та логістики [18]. Ключовими факторами виживання стають:

1) Мобільність та маневр. Аналіз бойових дій в Україні доводить, що тривале перебування на одній позиції після виконання вогневого завдання є фактично гарантією знищення [11]. Тактика "відстрілявся – зміни позицію" (shoot-and-scoot) стає не просто одним із варіантів дій, а базовою умовою виживання [5]. Цей принцип знайшов своє відображення в концепції Військово-Повітряних Сил США "Гнучке бойове застосування" (Agile Combat Employment), яка передбачає розосередження сил та швидке переміщення між різними позиціями для ускладнення планування противника [27].

2) Швидкість реакції. Мінімізація часу перебування на позиції та нормативів на згортання/розгортання комплексів стає критичним показником, що безпосередньо впливає на ймовірність виживання, як це доведено у математичних моделях українських науковців [12, 13].

3) Здатність до відновлення (регенерації). Оскільки уникнути втрат повністю неможливо, вирішального значення набуває здатність угруповання швидко відновлювати боєздатність: ремонтувати пошкоджену техніку, поповнювати боєкомплект, відновлювати уражені вузли управління [4, 18].

Основний принцип сучасного етапу – "бути непередбачуваним та здатним до регенерації".

Ця еволюція наочно демонструє, що поняття живучості постійно ускладнювалося, реагуючи на розвиток засобів ураження та розвідки. Таким чином, розробка нового, системного підходу, що інтегрує всі аспекти живучості в єдину концептуальну модель, є не просто науковим завданням, а нагальною потребою, продиктованою реаліями сучасної війни.

Таким чином, історичний аналіз наочно демонструє, що поняття живучості постійно ускладнювалося, реагуючи на розвиток засобів ураження та розвідки. Пасивний захист змінився на активне уникнення виявлення, а сьогодні цього вже недостатньо. Відповіддю на ці сучасні виклики є розробка цілісної, системної моделі, яка б синтезувала найкращі підходи минулого та адаптувала їх до реалій сьогодення. Саме така модель, що базується на декомпозиції живучості на ключові компоненти, представлена нижче.

Концептуальна модель живучості угруповання ЗРВ

Модель (рис. 1) базується на декомпозиції поняття живучості на чотири взаємопов'язані та синергетичні структурні компоненти: прихованість, стійкість, відновлюваність та адаптивність.

1. Прихованість (Stealthiness): принцип "не бути виявленим"

Прихованість – це здатність угруповання та його елементів уникати виявлення та ідентифікації засобами розвідки противника [10]. В умовах сучасної війни, що

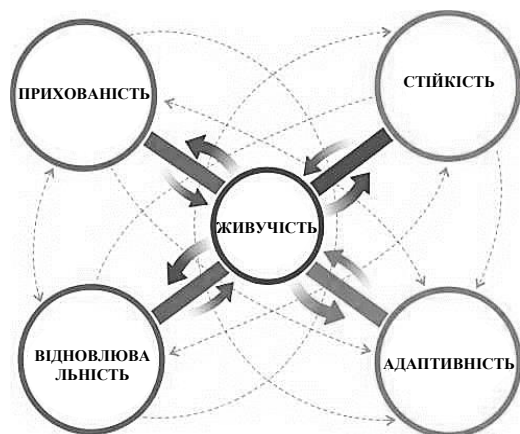


Рисунок 1. – Концептуальна модель живучості угруповання ЗРВ.

Джерело: розроблено автором.

характеризується “прозорістю” поля бою космічний, повітряний (особливо БПЛА) та радіотехнічний розвідці, прихованість є першим і найважливішим рубежем забезпечення живучості [2]. Основною метою цього компонента є максимальне ускладнення для противника циклу “розвідка-ураження” шляхом мінімізації ймовірності виявлення (P_v) [10]. Прихованість є комплексною властивістю, що реалізується через сукупність трьох ключових заходів: маскування, управління випромінюванням та введення в оману.

1) *Маскування (Concealment & Camouflage)*. Цей захід, що є фундаментом прихованості, спрямований на вирішення двох споріднених завдань: приховування (Concealment) – захист від спостереження противника, та камуфляж (Camouflage) – злиття з навколишнім середовищем [5]. Його основна мета – максимально ускладнити роботу засобів розвідки противника і, як наслідок, зірвати його цикл вогневого ураження.

Ефективне маскування має бути комплексним та безперервним, протидіючи виявленню у всіх основних діапазонах спостереження:

візуальний та оптичний: це класичний напрям, що передбачає використання табельних маскувальних сіток, фарбування техніки у відповідні кольори, а також максимальне використання природних маскуючих властивостей місцевості. Бойовий статут Сухопутних військ ЗС України прямо вимагає розміщувати озброєння та військову техніку в лісосмугах, ярах, за схилами висот та в межах населених пунктів для їх приховування від наземного та повітряного спостереження [29];

тепловий (інфрачервоний): сучасні засоби розвідки, особливо БПЛА, оснащені тепловізорами, що вимагає застосування спеціальних багатоспектральних покриттів та сіток, які розсіюють теплове випромінювання від працюючих двигунів та агрегатів техніки;

радіолокаційний: для протидії радіолокаційній розвідці використовуються спеціальні радіопоглинаючі матеріали та сітки, а також враховується рельєф місцевості для створення “радіолокаційної тіні”.

Досвід бойових дій в Україні доводить, що навіть прості заходи маскування значно підвищують живучість. Аналіз, проведений RUSI, показує, що українські сили активно використовують природні укриття для розосередження та приховування систем протиповітряної оборони (ППО), що значно ускладнює їх виявлення та ураження [2]. Успішне маскування безпосередньо впливає на математичні показники живучості, знижуючи ймовірність виявлення (P_v), що є вихідним параметром для подальших розрахунків у методах оцінювання [10].

2) *Управління випромінюванням (EMCON - Emissions Control)*. В умовах сучасної війни, що характеризується насиченістю поля бою засобами радіотехнічної розвідки (РТР) та наявністю у противника високоточних протирадіолокаційних ракет (ПРР), будь-яке випромінювання радіолокаційних засобів є потужним демаскуючим фактором, що може призвести до негайного вогневого удару. Управління випромінюванням (EMCON) є ключовим активним заходом прихованості, що спрямований на мінімізацію або повне виключення електромагнітних випромінювань для ускладнення його виявлення противником [7].

Реалізація EMCON передбачає комплексний підхід, що включає:

Суворе дотримання режимів радіомовчання: це базовий принцип, що вимагає від підрозділів ЗРВ уникати невиннованого використання радіостанцій та інших випромінюючих пристроїв.

Мінімізація часу роботи РЛС в активному режимі: Замість постійного сканування простору, РЛС має працювати в режимі короточасних, періодичних включень (“flicker” або “миготіння”). Це значно скорочує “вікно”, протягом якого засоби РТР противника можуть запеленгувати та ідентифікувати позицію комплексу [7].

Максимальне використання пасивних засобів розвідки: Пріоритет надається пасивним сенсорам (таким як станції пасивної радіотехнічної розвідки, оптико-електронні станції), які дозволяють отримувати інформацію про повітряну обстановку, не демаскуючи себе випромінюванням.

Використання зовнішніх джерел цілевказання: Отримання даних про повітряні цілі від вищих командних пунктів, літаків ДРЛВ, сусідніх підрозділів чи інших джерел розвідки дає змогу тримати власні РЛС у пасивному режимі аж до моменту безпосередньої підготовки до пуску ракети.

В контексті багатодомених операцій, управління випромінюванням набуває ще більшого значення, оскільки електромагнітний спектр є таким самим полем бою, як і фізичні домени [19; 20]. Контроль над власними випромінюваннями є ключовим елементом протидії ворожому таргетингу, який інтегрує дані з різних доменів для наведення високоточної зброї [21]. Успішне застосування EMCON безпосередньо впливає на показники живучості, що використовуються в

математичних моделях, суттєво знижуючи ймовірність виявлення (P_v), яка є вихідним параметром для подальших розрахунків [10].

3) *Ведення в оману (Deception): принцип “змусити противника помилитися”*. Ведення в оману є активним та інтелектуальним компонентом прихованості, що спрямований не просто на приховування своїх сил, а на цілеспрямоване введення противника в оману щодо реального складу, розташування, намірів та бойових можливостей угруповання військ [5]. Його кінцева мета – змусити противника прийняти хибне рішення: зосередити розвідку на неіснуючих об’єктах, завдати удару по хибних цілях або невірно оцінити бойовий потенціал угруповання, що призведе до зриву його планів [24].

Ефективність введення в оману досягається шляхом створення цілісної, правдоподібної, але неправдивої картини бойових дій для противника через застосування таких заходів:

1) Створення хибних позицій та районів: це основний тактичний прийом, що передбачає обладнання позицій, аналогічних реальним, але без розміщення на них справжньої техніки та особового складу [29]. Ефективність хибних позицій значно зростає при використанні:

макетів техніки: від простих надувних макетів до повнорозмірних копій, здатних імітувати техніку у візуальному та радіолокаційному діапазонах;

імітаторів випромінювання: спеціальних пристроїв, що імітують теплове (інфрачервоне) та електромагнітне (робота РЛС) випромінювання реальних зразків ОВТ, що робить хибну позицію невідрізнимою для технічних засобів розвідки противника.

2) Демонстративні дії: проведення імітації активної діяльності на хибних напрямках (переміщення техніки, радіообмін у мережах) з метою відволікання уваги противника від районів зосередження основних сил.

Успішне введення в оману дозволяє досягти значної воєнно-економічної переваги, змушуючи противника витратити дороговартісні високоточні боєприпаси (крилаті ракети, баражуючі боєприпаси) на знищення дешевих макетів. Це не лише підвищує живучість реальних підрозділів, а й виснажує бойовий потенціал ворога. Важливість цього заходу знайшла своє відображення в українських математичних моделях оцінки живучості, де ефективність введення в оману враховується через коефіцієнти кількості (η) та правдоподібності (ξ) хибних позицій, які безпосередньо впливають на зниження ймовірності виявлення реальних об’єктів [10].

2. Стійкість (Robustness): принцип “витримати удар”

Стійкість – це здатність угруповання витримувати вогневий, радіоелектронний та кібернетичний вплив, зберігаючи структурну цілісність та критично важливі функції, коли заходи прихованості не спрацювали або є недостатніми [16; 17]. Цей компонент є другим

рубежем оборони і визначає здатність системи продовжувати функціонувати навіть після зазнаних пошкоджень. На відміну від живучості окремого зразка ОВТ, стійкість угруповання є комплексною властивістю, що забезпечується як фізичним захистом, так і, що більш важливо, його рациональною структурною організацією.

Фізичний захист. Це класичний елемент стійкості, що передбачає зменшення вразливості до кінетичного впливу противника. Він включає:

1) Інженерне обладнання позицій: спорудження укриттів для техніки та особового складу (окопи, капонири, бліндажі), а також обвалування [29]. Це відповідає класичному визначенню “cover” у доктрині США – захист від прямого та непрямого вогню [5]. Ефективність інженерного обладнання є класично вимірною величиною, що враховується у математичних моделях як коефіцієнт, що знижує ймовірність ураження (P_{up}) [10];

2) Використання захисних властивостей місцевості: розміщення елементів угруповання за природними перешкодами (пагорби, схили), що забезпечують додатковий захист [29].

Структурна організація. Це ключовий фактор стійкості саме угруповання як системи. Він дозволяє мінімізувати наслідки ураження окремих елементів та зберегти загальну боєздатність.

1) Розосередження (Dispersal): розміщення елементів угруповання (пунктів управління, РЛС, пускових установок) на місцевості на відстанях, що виключають їх одночасне ураження одним боєприпасом або однією вогневою групою [29]. Цей принцип є основоположним як у статутах ЗС України, так і в доктринах НАТО [7].

2) Ешелонування та взаємне прикриття (Layering and Mutual Support): побудова бойових порядків, де комплекси різної дальності та призначення прикривають один одного. Наприклад, ЗРК великої дальності прикриваються комплексами середньої та малої дальності, що створює ешелоновану систему ППО.

3) Надлишковість та живучість системи управління (C2 Redundancy): в умовах сучасної війни система управління є пріоритетною ціллю. Тому стійкість угруповання прямо залежить від живучості його “нервової системи” [16]. Це досягається шляхом створення запасних та мобільних резервних пунктів управління, дублювання каналів зв’язку (дротових, радіорелейних, супутникових) та розробки процедур швидкої передачі функцій управління [17].

3. Відновлюваність (Resilience): принцип “повернутися в бій”

Відновлюваність – це здатність угруповання швидко відновлювати свою боєздатність та втрачені внаслідок вогневого та іншого впливу противника функції [18]. Цей компонент є динамічною характеристикою, що визначає здатність системи до “регенерації” та мінімізації наслідків ураження. Якщо стійкість дозволяє “пережити” удар, то відновлюваність забезпечує здатність продовжувати боротьбу. Вона є критично

важливою в умовах затяжних бойових дій високої інтенсивності, де уникнути втрат повністю неможливо. Компонент включає три ключові напрями:

Відновлення ОБТ та логістика. Це матеріальна основа відновлення. Вона передбачає наявність ефективної, захищеної та гнучкої системи логістичного забезпечення. До неї входить:

1) Система відновлення ОБТ: наявність підготовлених ремонтно-відновлювальних органів, запасу матеріальних засобів, ресурсів, запасних частин та інструментів (ЗІП), а також відпрацьованих процедур евакуації пошкодженої техніки з поля бою та її оперативного ремонту [4].

2) Логістичне забезпечення: своєчасне та безперебійне поповнення боєкомплекту, пально-мастильних матеріалів та інших засобів. Стійкість самої системи логістики, як доведено у працях О. Доски та П. Опенька, є одним з ключових чинників, що впливають на живучість бойових підрозділів [18].

Відновлення управління. Це “нервова система” відновлюваності. Оскільки пункти управління є пріоритетними цілями для противника, здатність угруповання швидко відновити керованість є вирішальною [16]. Це досягається через:

1) Швидку реконфігурацію мереж: можливість оперативно перерозподіляти функції ураженого пункту управління на резервний (мобільний, розосереджений), відновлювати втрачені канали зв’язку та переналаштовувати потоки даних;

2) Математичне моделювання відновлення: у сучасних наукових підходах процес відновлення управління є класично вимірною величиною. Наприклад, у моделях, що використовують апарат марковських процесів, здатність системи повернутися з пошкодженого стану в боєздатний описується через інтенсивність потоку відновлень $(\lambda k, k-1)$ [17]. Чим вищий цей показник, тим швидше система відновлює свою функціональність.

4. Адаптивність (Adaptability): принцип “бути непередбачуваним”

Адаптивність – це здатність угруповання динамічно змінювати свою структуру, тактику дій та алгоритми функціонування у відповідь на зміни в обстановці та діях противника [11; 12]. Якщо стійкість дозволяє витримати удар, а відновлюваність – ліквідувати його наслідки, то адаптивність спрямована на те, щоб унеможливити або значно ускладнити для противника саму можливість завдати ефективного удару. Це найважливіший проактивний компонент живучості в умовах сучасної швидкоплинної війни.

Маневр: є ключовим та найбільш очевидним проявом адаптивності. Постійна та непередбачувана для противника зміна вогневих позицій за принципом “відстрілявся – зміни позицію” (shoot-and-scoot) є фундаментальною умовою виживання на сучасному полі бою [5]. Досвід бойових дій в Україні переконливо доводить, що тривале перебування на одній позиції після виходу в ефір або виконання вогневого

завдання робить ураження підрозділу лише питанням часу [2, 11]. Ця тактика прямо протидіє ворожому циклу “розвідка-ураження”, оскільки на момент, коли противник отримує точні координати та готується завдати удару, підрозділ вже знаходиться в русі на нову позицію.

Тактична гнучкість: Адаптивність не обмежується лише фізичним переміщенням. Вона включає застосування нестандартних тактичних прийомів, що створюють для противника постійну невизначеність. До таких прийомів належать:

“кочуючі ЗРК”: дії окремих пускових установок або батарей у відриві від основних сил з постійною зміною районів базування;

“зенітні засідки”: приховане розгортання на неочікуваних для противника напрямках з метою раптового ураження повітряних цілей;

динамічна зміна бойових порядків: перегрупування сил та засобів у відповідь на зміну напрямку основних зусиль противника. Ці заходи, як зазначається у дослідженнях [14], дозволяють нівелювати кількісну та технологічну перевагу ворога.

Багатодоменна адаптація: в умовах багатодомених операцій адаптивність має проявлятися не лише у фізичному просторі. Угруповання повинно демонструвати гнучкість і в інших доменах. Це здатність оперативно змінювати робочі частоти, переходити на резервні канали управління та змінювати протоколи передачі даних для протидії засобам РЕБ противника. Також це включає здатність до реконфігурації комп’ютерних мереж для протидії кіберзагрозам, що є ключовим для збереження керованості в умовах комплексного впливу [20].

Синтез: Комплексне визначення живучості угруповання ЗРВ

На основі детального аналізу компонентів моделі та їх взаємозв’язку, головним результатом роботи є формулювання нового, системного визначення поняття.

Живучість угруповання зенітних ракетних військ – це комплексна характеристика, що визначає властивості створеного угруповання зенітних ракетних військ та його елементів зберігати боєздатність, структурну цілісність, функціональність та спроможність ефективно виконувати бойові завдання в умовах організованого цілеспрямованого впливу противника [32].

Таким чином, запропонований підхід представляє живучість не як окремий показник (наприклад, імовірність неуразення), а як інтегральну системну властивість. Воно поєднує в собі здатність зберігати структурну цілісність (компонент “Стійкість”), функціональність (компоненти “Стійкість” та “Відновлюваність”), та боєздатність (інтегральний результат взаємодії всіх компонентів), що і дозволяє ефективно виконувати завдання. На відміну від попередніх підходів, це визначення є універсальним, оскільки не прив’язане до конкретного типу загроз, та комплексним, бо охоплює як фізичне виживання елементів, так і

збереження функціональних зв'язків між ними, що є основою боєздатності угруповання як єдиного організму. Цей результат є теоретичним фундаментом для подальшого обговорення практичних аспектів та наслідків нового розуміння живучості.

Обговорення

Представлена концептуальна модель та нове визначення живучості є вирішенням поставленого наукового завдання. На відміну від існуючих підходів, що часто фокусуються на окремих аспектах, розроблена чотирикомпонентна модель (прихованість, стійкість, відновлюваність, адаптивність) систематизує та розвиває попередні наукові напрацювання. Вона надає концептуальний контекст як для західних тактичних підходів, таких як C³D [5], так і для українських математичних моделей, що оцінюють імовірнісні показники виживання [9-11].

1) Актуальність моделі в контексті багатодомених операцій

Сучасні військові концепції передбачають ведення багатодомених операцій (MDO), що об'єднують дії у фізичних доменах з космосом та кіберпростором [19]. Це означає, що загроза для угруповання ЗРВ стає комплексною: кібератаки на системи управління, придушення GPS з космосу, удари БпЛА та балістичних ракет [20, 22, 28].

Запропонована модель живучості є адекватною відповіддю на ці загрози, оскільки кожен її компонент набуває багатодоменого виміру:

“Стійкість” тепер включає не лише фізичний захист, а й кіберзахищеність та стійкість до радіоелектронного придушення;

“Прихованість” вимагає протидії не тільки візуальній та радіотехнічній, а й космічній розвідці;

“Адаптивність” передбачає маневр не лише на землі, а й у кіберпросторі (швидка зміна частот, протоколів, мережних конфігурацій) [20; 21].

Практичним прикладом реалізації цих принципів є концепція Військово-Повітряних Сил США “Гнучке бойове застосування” (Agile Combat Employment, ACE), що передбачає розосередження сил по мережі невеликих аеродромів для ускладнення планування противника [27]. Цей підхід, як показує досвід України [2], є життєво необхідним для збереження бойового потенціалу.

2) Практичні імплікації: від теорії до дій

Новий підхід до розуміння живучості вимагає перегляду практичних аспектів діяльності військ.

Зміна у плануванні операцій. Командири та штаби отримують інструмент для комплексного, а не одностороннього планування. Замість фокусування виключно на інженерному обладнанні позицій, планування має в рівній мірі включати заходи з введення противника в оману, організацію маневру та створення стійкої системи логістики та ремонту.

Людський фактор та підготовка. Ефективність моделі залежить від людського фактора: рівня підготовки особового складу, психологічної стійкості та здатності командирів швидко приймати нестандартні рішення в умовах стресу. Запропонована модель дозволяє висунути нові

вимоги до підсистем “Навчання” та “Лідерство”. Відпрацювання нормативів маневру, дій під вогнем та в умовах РЕБ має стати пріоритетом.

Воєнно-економічний аспект. Інвестиції в комплексні заходи з підвищення живучості (маскування, маневр, створення хибних цілей) є значно ефективнішими, ніж покриття втрат дороговартісних зразків ОБТ. Таким чином, забезпечення живучості є не лише тактичною необхідністю, а й економічно доцільною стратегією збереження найцінніших оборонних активів держави.

3) Напрями подальших досліджень

Перспективним напрямом є розробка на основі запропонованої концептуальної моделі відповідного науково-методичного апарату для кількісного оцінювання узагальненого показника живучості угруповання зенітних ракетних військ в операціях. Це дозволить перейти від якісного аналізу до розробки конкретних нормативів та критеріїв, необхідних для прийняття рішень у процесі планування бойового застосування, зокрема через імітаційне моделювання [33].

Висновки

На основі проведеного дослідження, що включало аналіз сучасних українських наукових праць, закордонних доктринальних документів та досвіду російсько-української війни, можна зробити наступні висновки:

1. Класичні підходи до визначення живучості, які часто фокусуються на окремих тактичних заходах або фізичній стійкості окремих зразків озброєння, є недостатніми для адекватного опису викликів сучасної війни. Виявлено невирішене завдання, яке полягає в удосконаленні існуючої концептуальної моделі, яка б системно інтегрувала різні аспекти живучості.

2. Основним результатом роботи є розробка нового системного підходу до розуміння живучості, який представлено у вигляді чотирикомпонентної концептуальної моделі (прихованість, стійкість, відновлюваність, адаптивність). На основі цієї моделі сформульовано нове, комплексне визначення живучості угруповання ЗРВ, що розглядає її як інтегральну характеристику, яка забезпечує збереження боєздатності, структурної цілісності та функціональності системи.

3. Наукова новизна запропонованого підходу полягає у синтезі тактичних, технічних, організаційних та математичних аспектів в єдину логічну структуру. На відміну від попередніх методик, він розглядає живучість як емерджентну властивість угруповання, що дозволяє більш повно враховувати синергетичні ефекти від взаємодії його елементів та адекватно реагувати на загрози в багатодоменому операційному середовищі.

4. Практичне значення дослідження полягає у наданні органам військового управління концептуального інструменту для комплексного планування заходів із підвищення живучості угруповання ЗРВ в операціях. Це дозволяє змістити акценти з переважно пасивного захисту на збалансоване поєднання всіх компонентів, що є

критично важливим для збереження бойового потенціалу військ. Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення як національних керівних документів, так і доктрин НАТО, зокрема АJP-3.3 [26].

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка на основі запропонованої концептуальної моделі відповідного науково-методичного апарату для кількісного оцінювання узагальненого показника живучості угруповання ЗРВ в операціях. Це дозволить перейти від якісного аналізу до розробки конкретних нормативів та критеріїв, необхідних для прийняття рішень у процесі планування бойового застосування угруповання ЗРВ в операціях.

Список використаних джерел

1. А. Корецький, В. Семененко, С. Возняк, Р. Черевко, О. Демешко, “Гібридна агресія Російської Федерації: досвід протидії України, наслідки для Європи”, зб. матеріалів міжнар. наук.-практ. конф. Національного університету оборони України ім. І. Черняховського, Київ, 2021, с. 227. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://nuou.org.ua/assets/documents/hibr-agr-rf-22.pdf>.
2. J. Watling, N. Reynolds, *Tactical Developments During the Third Year of the Russo–Ukrainian War*. London: Royal United Services Institute, 2025, p. 48.
3. В. Горбенко, В. Кірсенко, П. Чернявський, В. Камінський, “Аналіз досвіду застосування ракетного балістичного озброєння та шляхи протидії ракетним загрозам”, *Повітряна міць України*, № 1(8), с. 5–16, 2025. doi: 10.33099/2786-7714-2025-1-8-5-16. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <http://sap.nuou.org.ua/article/view/325279/321366>.
4. П. Опенько, О. Доска, А. Дудуш, А. Козир, “Методичний підхід до розрахунку ефективності усунення бойових пошкоджень і відновлення працездатності бойових засобів зенітних ракетних комплексів у контрнаступальній операції в сучасних умовах”, *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 7(1), с. 68–77, 2021. doi: doi.org/10.37701/dndivsovt.7.2021.08. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/89/86>.
5. J. Smallfield, *What is the Role of Survivability Operations in the Current Force?* Fort Leavenworth, KS: U.S. Army Command and General Staff College, 2003, p. 109.
6. *Field Manual 3-0: Operations*. Washington, DC: Headquarters, Dept. of the Army, 2019, p. 378.
7. *Field Manual 3-01: U.S. Army Air and Missile Defense Operations*. Washington, DC: Headquarters, Dept. of the Army, 2015, p. 274.
8. R. G. R. Smith, *Towards A Definition Of Survivability for the Australian Defence Force*. Canberra: Land Warfare Studies Centre, 2009, p. 85.
9. С. Гогоняц, В. Крищенко, О. Колеснік, “Вибір показників оцінювання живучості угруповання радіотехнічних військ”, *Системи озброєння і військова техніка*, № 4(56), с. 7–12, 2018. doi: 10.30748/soivt.2018.56.01.
10. В. Мегельбей, С. Кравченко, Д. Іценко, Р. Олійник, С. Цілина, “Методика оцінювання живучості системи управління вогнем зенітного підрозділу (частини)”, *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 3(15), с. 77–83, 2020. doi: 10.37701/dndivsovt.3.2020.10. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/33/32>.
11. Є. Кондратенко, “Удосконалена методика оцінювання живучості артилерійських підрозділів у наступальному бою”, *Грааль науки*, № 39, с. 249–258, 2024. doi: 10.36074/grail-of-science.10.05.2024.034. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/2329/2353>.
12. Ю. Репіло, О. Головенко, “Обґрунтування показників та критерію можливої живучості артилерійських підрозділів під час вогневої підтримки в наступальних діях”, *Системи озброєння і військова техніка*, № 3(67), с. 39–44, 2021. doi: 10.30748/soivt.2021.67.05. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/view/731/632>.
13. О. Титаренко, Є. Власенко, “Знищення засобів повітряного нападу противника під час російсько-української війни”, *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*, № 3(82), с. 17–25, 2024. doi: 10.33099/2304-2745/2024-3-82/17-25. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <http://znp-cvcsd.nuou.org.ua/article/view/321309>.
14. К. Горбачов, “Удосконалена методика та алгоритм оцінювання ефективності функціонування системи протиповітряної оборони тактичного рівня”, *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 3(42), с. 17–24, 2021. doi: 10.33099/2311-7249/2021-42-3-17-24. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://sit.nuou.org.ua/article/view/243665/244054>.
15. О. Титаренко, Є. Власенко, “Протиповітряна оборона в російсько-українській війні: уроки та рекомендації”, *Повітряна міць України*, № 6(1), с. 49–55, 2024. doi: 10.33099/2786-7714-2024-1-6-49-55. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://sap.nuou.org.ua/article/view/302608>.
16. Ю. Гусак, В. Шевченко, “Методичний підхід щодо аналізу живучості системи пунктів управління”, *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 1(37), с. 191–196, 2020. doi: 10.33099/2311-7249/2020-37-1-191-196. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://sit.nuou.org.ua/article/view/198442/203500>.
17. С. Кірсанов, “Метод обґрунтування вимог до живучості перспективної автоматизованої системи управління військами”, *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 2(12), с. 53–63, 2022. doi: 10.37701/dndivsovt.12.2022.06. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/163/161>.
18. О. Доска, П. Опенько, А. Дудуш, М. Суграй, “Визначення показника ефективності відновлення зенітного ракетного озброєння з урахування ресурсних обмежень”, *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 37(1), с. 15–20, 2020. doi: 10.33099/2311-7249/2020-37-1-15-20. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://sit.nuou.org.ua/article/view/194228/202472>.
19. О. Хімченко, “Формалізація завдання з дезорганізації системи протиповітряної оборони противника”, *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*, № 2(75), с. 26–32, 2022. doi: 10.33099/2304-2745/2022-2-75/26-32. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <http://znp-cvcsd.nuou.org.ua/article/view/266774>.
20. О. Сальнікова, В. Корендович, П. Мінесв, С. Антоненко, “Аналіз воєнних аспектів гібридної війни: їх зміст та уроки протидії”, *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 2(32), с. 111–118, 2018. doi: 10.33099/2311-7249/2018-32-2-111-118. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://sit.nuou.org.ua/article/download/157985/157609/345571>.
21. В. Горбенко, А. Кучинська, В. Гудим, “Особливості

таргетингу в сучасних об'єднаних та майбутніх багатодомених операціях", Повітряна міць України, № 2(5), с. 10–16, 2023. doi: 10.33099/2786-7714-2023-2-5-10-16. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <http://sap.nuou.org.ua/article/view/291360/285999>.

22. В. Горбенко, О. Коршець, "Запобігання можливій ескалації в повітряному домені збройної боротьби", Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського, № 3(79), с. 52–60, 2023. doi: 10.33099/2304-2745/2023-3-79/52-60. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <http://znpcvsd.nuou.org.ua/article/view/298229>.

23. Field Manual 3-90: Tactics. Washington, DC: Headquarters, Dept. of the Army, 2011, p. 266.

24. Army Doctrine Publication 3-13: Information Operations. Washington, DC: Headquarters, Dept. of the Army, 2023, p. 80.

25. Joint Publication 1-02: Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms. Washington, DC: The Joint Staff, 2021, p. 370.

26. Allied Joint Publication 3.3: Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations. Brussels: NATO Standardization Office, 2016, p. 166.

27. Air Force Doctrine Note 1-21: Agile Combat Employment. Washington, DC: Curtis E. LeMay Center for Doctrine Development and Education, 2022, p. 72.

28. "The US Army's multi-domain-operations doctrine",

The International Institute for Strategic Studies, 2022. [Online]. Available: <https://www.iiss.org/publications/strategic-comments/2022/the-us-armys-multi-domain-operations-doctrine/>.

29. Бойовий статут Сухопутних військ Збройних Сил України "Операції з розміщення військ" (тактичний рівень). Київ, 2021, с. 48.

30. J. Zych, "The Development of the Israeli National Missile Defense Concept", Kwartalnik Bellona, no. 2, pp. 75–88, 2020. [Online]. Available: https://zbrojni.blob.core.windows.net/pzdata2/TinyMceFiles/bellona2_2020.pdf.

31. В. Горбенко, П. Опенько, Є. Власенко, "Протидія повномасштабній російській агресії в повітряному домені", Теоретико-прикладні аспекти російсько-української війни: всеохоплювача оборона, розвиток та посилення спроможностей: монографія, м. Київ: НУОУ, 2025, с. 72–79.

32. М. Єрмошин, О. Кулешов, Г. Романенко, І. Чернигел, "Підхід щодо оцінки ефективності бойових дій угруповання зенітних ракетних військ", Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, № 2, с. 113–118, 2019. doi: 10.30748/nitps.2019.35.14. Дата звернення: 28 серп. 2025. [Онлайн]. Доступно: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2019_2_17.

33. "Using agent-based modeling and a designed experiment to simulate and analyze a new air-to-air missile", ResearchGate, 2016, p. 10.

Yevhen Vlasenko

<https://orcid.org/0009-0005-6376-6104>

Yurii Horobets (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-7994-2022>

Oleksandr Tytarenko (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-3992-9314>

Pavlo Shchypanskyi (Candidate of Military Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-0854-733X>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SURVIVABILITY OF THE ANTI-AIRCRAFT MISSILE FORCES GROUP IN MODERN OPERATIONS (COMBAT): SYSTEM OF VIEWS, ESSENCE AND DEFINITION

The article analyzes existing approaches to determining the survivability of groups of anti-aircraft missile forces. It has been established that traditional approaches that focus on individual tactical measures or mathematical modeling of the survival of individual elements do not fully meet the challenges of modern warfare, in particular, countering reconnaissance and strike systems based on unmanned aerial vehicles. An unresolved task has been identified, which consists in the absence of a single conceptual model that would systematically integrate various aspects of survivability. A new systematic approach has been developed using the methods of system and comparative analysis, as well as decomposition and synthesis based on the study of the experience of hostilities in the Russian-Ukrainian war, domestic scientific works and foreign doctrinal documents. As a result, a four-component conceptual model of survivability is proposed, including concealment, stability, recoverability and adaptability. On the basis of this model, a new, comprehensive definition of the survivability of the group of anti-aircraft missile forces as its integrative, emergent property is formulated. It has been proven that the proposed approach is an adequate response to threats in today's multi-domain operational environment and allows for more reasonable development of comprehensive measures to increase the combat potential of troops.

Keywords: survivability, survivability indicators, anti-aircraft missile forces, efficiency, systems approach, conceptual model, russian-ukrainian war, multi-domain operations, combat potential, command and control, planning, troop grouping, reconnaissance means, modeling, unmanned aerial vehicles.

References

1. Koretsky A. A., Semenenko V. M., Voznyak S. M., Cherevko R. M., Demeshok O. O. Hybrid aggression of the Russian Federation: experience of counteraction by Ukraine, consequences for Europe: collection of materials of the international scientific and practical

conference of the National Defense University of Ukraine named after I. Chernyakhovsky. Kyiv: NUOU, 2021. P. 227. <https://nuou.org.ua/assets/documents/hibr-agr-rf-22.pdf>.

2. Watling J., Reynolds N. Tactical Developments During the Third Year of the Russo-Ukrainian War. London: Royal United Services Institute, 2025. P. 48.

3. Gorbenko V., Kireenko V., Chernyavskiy P., Kaminskyi V. Analysis of the experience of using ballistic missile weapons and ways to counter missile threats. *Air Power of Ukraine*. 2025. No. 1(8). P.5–16. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-5-16>.
4. Openko P., Doska O., Dudush A., Kozyr A. Methodical approach to calculating the effectiveness of eliminating combat damage and restoring the operability of anti-aircraft missile systems in a counter-offensive operation in modern conditions. *Collection of scientific works; State Research Institute of Testing and Certification of Armaments and Military Equipment*. 2021. No.7(1). P. 68–77. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/89/86>.
5. Smallfield J.L. What is the Role of Survivability Operations in the Current Force? Fort Leavenworth, Kansas : U.S. Army Command and General Staff College. 2003. P 109.
6. Field Manual 3-0. Operations. Washington, DC : Headquarters, Department of the Army. 2019. P 378.
7. Field Manual 3-01. U.S. Army Air and Missile Defense Operations. Washington, DC : Headquarters, Department of the Army. 2015. P 274.
8. Smith R. G. R. Towards A Definition Of Survivability for the Australian Defence Force. Canberra : Land Warfare Studies Centre. 2009. P 85.
9. Gogonyants S. Yu., Kryshchenko V. M., Kolesnik O. M. Selection of indicators for assessing the survivability of a group of radio engineering troops. *Weapons Systems and Military Equipment*. 2018. No. 4(56). P. 7–12. DOI: 10.30748/soivt.2018.56.01.
10. Megelbei V.V., Kravchenko S.O., Itsenko D.S., Oliynyk R.M., Tsilyna S.V. Methodology for assessing the survivability of the fire control system of an anti-aircraft unit (unit). *Collection of scientific works of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment*. 2020. No. 3(15). P. 77–83. DOI: 10.37701/dndivsovt.3.2020.10.
11. Kondratenko E. V. Improved methodology for assessing the survivability of artillery units in offensive combat. *Graill of Science*. 2024. No. 39. P. 249–258. DOI: 10.36074/grail-of-science.10.05.2024.034.
12. Repilo Yu. E., Golovchenko O. V. Substantiation of indicators and criteria for possible survivability of artillery units during fire support in offensive operations. *Weapons Systems and Military Equipment*. 2021. No. 3(67). P. 39–44. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.05>.
13. Tytarenko O. B., Vlasenko E. V. Destruction of enemy air attack means during the Russian-Ukrainian war. *Collection of scientific papers of the Center for Military and Strategic Studies of the Ivan Chernyakhovsky National Defense University of Ukraine*. 2024. No. 3(82). P. 17–25. <http://znp-cvds.nuou.org.ua/article/view/321309>.
14. Gorbachev K. M. Improved methodology and algorithm for assessing the effectiveness of the tactical-level air defense system. *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2021. No. 3(42). P. 17–24. DOI: 10.33099/2311-7249/2021-42-3-17-24.
15. Tytarenko O. B., Vlasenko E. V. Air defense in the Russian-Ukrainian war: lessons and recommendations. *Air power of Ukraine*. 2024. No. 6(1). P. 49–55. <https://sap.nuou.org.ua/article/view/302608>.
16. Gusak Yu.A., Shevchenko V.K. Methodological approach to the analysis of the survivability of the control point system. *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2020. No. 1(37). P. 191–196. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-37-1-191-196.
17. Kirsanov S.O. Method of substantiating the requirements for the survivability of a promising automated troop control system. *Collection of scientific works of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment*. 2022. No. 2(12). P. 53–63. DOI: 10.37701/dndivsovt.12.2022.06.
18. Doska, O. M., Openko, P. V., Dudush, A. S. and Sughray, M. V. Determination of the efficiency indicator of the restoration of anti-aircraft missile weapons taking into account resource constraints. *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2020. No. 37(1). P. 15–20. DOI: 10.33099/2311-7249/2020-37-1-15-20.
19. Khimchenko O. S. Formalization of the task of disorganizing the enemy's air defense system. *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Research of the Ivan Chernyakhovsky National Defense University of Ukraine*. 2022. No. 2(75). P. 26–32. <http://znp-cvds.nuou.org.ua/article/view/266774>.
20. Salnikova O. F., Korendovych V. S., Mineev P. A., Antonenko S. I. Analysis of military aspects of hybrid warfare: their content and lessons for counteraction. *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2018. No. 2(32). P. 111–118. <https://sit.nuou.org.ua/article/download/157985/157609/345571>.
21. Gorbenko V.M., Kuchynska A.V., Gudym V.M. Peculiarities of targeting in modern joint and future multi-domain operations. *Air Power of Ukraine*. 2023. No. 2(5). P. 10-16. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-10-16>.
22. Gorbenko V.M., Korshets O.A. Preventing possible escalation in the air domain of armed struggle. *Collection of scientific papers of the Center for Military and Strategic Studies of the Ivan Chernyakhovsky National Defense University of Ukraine*. 2023. No. 3(79). P. 52–60. <http://znp-cvds.nuou.org.ua/article/view/298229>.
23. Field Manual 3-90. Tactics. Washington, DC : Headquarters, Department of the Army. 2011. P 266.
24. Army Doctrine Publication 3-13. Information Operations. Washington, DC : Headquarters, Department of the Army. 2023. P 80.
25. Joint Publication 1-02. Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms. Washington, DC : The Joint Staff. 2021. P 370.
26. Allied Joint Publication 3.3. Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations. Brussels : NATO Standardization Office. 2016. P 166.
27. Air Force Doctrine Note 1-21. Agile Combat Employment. Washington, DC : Curtis E. LeMay Center for Doctrine Development and Education. 2022. P 72.
28. The US Army's multi-domain-operations doctrine. London : The International Institute for Strategic Studies. 2022. <https://www.iiss.org/publications/strategic-comments/2022/the-us-armys-multi-domain-operations-doctrine/>.
29. Combat Regulations of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine “Operations for the Deployment of Troops” (tactical level). Kyiv. 2021. 48 p.
30. Zych J. The Development of the Israeli National Missile Defense Concept. *Kwartalnik Bellona*. 2020. № 2. C. 75–88. https://zbrojni.blob.core.windows.net/pzdata2/TinyMceFiles/bellona2_2020.pdf.
31. Gorbenko V.M., Openko P.V., Vlasenko E.V. Counteraction to full-scale Russian aggression in the air domain. *Theoretical and applied aspects of the Russian-Ukrainian war: comprehensive defense, development and strengthening of capabilities*: monograph / edited by M.V. Koval. Kyiv: NUOU, 2025. P. 72-79.
32. Yermoshyn M. O., Kuleshov O. V., Romanenko G. A., Chernygel I. S. Approach to assessing the effectiveness of combat operations of anti-aircraft missile forces groups. *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. 2019. No. 2. P. 113–118. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2019_2_17.
33. Using agent-based modeling and a designed experiment to simulate and analyze a new air-to-air missile. ResearchGate. 2016. P 10.

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-15-19

УДК: 355.359 (477)

Кресан Сергій Володимирович

<https://orcid.org/0009-0009-4251-605X>

Пуховий Олександр Володимирович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-2863-3374>

Щипанський Павло Володимирович (кандидат військових наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0002-0854-733X>

Ясинецький Василь Павлович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-0643-3021>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УПРАВЛІННЯ УГРУПОВАННЯМ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВІЙСЬК В ОБОРОННІЙ ОПЕРАЦІЇ ОПЕРАТИВНОГО УГРУПОВАННЯ ВІЙСЬК (СИЛ)

Досвід російсько-української війни підтвердив, що радіотехнічні війська є основним джерелом інформації про повітряну обстановку. Якісне виконання завдань радіолокаційної розвідки засобів повітряного нападу противника та видачі радіолокаційної інформації неможливе без ефективного управління угрупованням радіотехнічних військ в умовах постійного вогневого та радіоелектронного впливу противника на систему управління угрупованням радіотехнічних військ. У статті проаналізовано основні фактори, що впливають на ефективність управління угрупованням радіотехнічних військ в оборонній операції оперативного угруповання військ у сучасних умовах ведення бойових дій з метою визначення їх впливу та можливих наслідків на систему управління в ході бойового застосування радіотехнічних військ.

Ключові слова: радіотехнічні війська, управління, оборонна операція, фактор, безперервність, стійкість, оперативність.

Вступ

Досвід російсько-української війни свідчить, що перебіг бойових дій характеризується застосуванням різноманітних засобів повітряного нападу (ЗПН) противника з метою розвідки та ураження [1, 2]. В таких умовах різко зростає роль радіотехнічних військ (РТВ), які ведуть радіолокаційну розвідку ЗПН противника для якісного виконання оперативного завдання оборонної операції, а саме відбиття повітряного нападу противника.

Слід зазначити, що ефективність виконання бойових завдань угрупованням РТВ в значній мірі залежатиме від ефективності управління угрупованням РТВ, яке буде зумовлене діями противника та організаційними і технічними заходами щодо організації управління. Тому актуальним завданням є визначення факторів, які впливають на ефективність управління угрупованням РТВ в оборонній операції оперативного угруповання військ (ОУВ), з визначенням їхнього впливу на безперервність, стійкість та оперативність управління.

Матеріали та методи

Аналіз публікацій свідчить, що питанням управління військами приділяється значна увага. Деякі аспекти управління за контролем повітряного простору висвітлюються у стандарті НАТО [3]. Окремі публікації [4-8] стосуються дослідження ефективності функціонування систем

управління військового призначення, в тому числі ефективності функціонування системи управління угруповання РТВ. Так, в [9] авторами запропоновано показники оцінювання ефективності функціонування системи управління угруповання РТВ. Проте аналіз наукових джерел свідчить про недостатнє висвітлення проблем ефективності управління угрупованням РТВ. Зокрема, потребує подальшого вивчення вплив конкретних факторів (організаційних, технічних та ін.) на ефективність управління угрупованням РТВ в умовах оборонної операції та комплексного застосування противником засобів розвідки, радіоелектронної боротьби (РЕБ), високоточної зброї на елементи системи управління. Це обумовлює необхідність поглибленого дослідження цієї проблематики з урахуванням досвіду російсько-української війни.

Отже, **метою статті** є аналіз факторів, які впливають на ефективність управління угрупованням РТВ в оборонній операції ОУВ, визначення їх впливу та можливих наслідків на систему управління в ході бойового застосування РТВ.

Результати

Повномасштабне вторгнення російської федерації у 2022 році супроводжувалося комплексним застосуванням противником вогневих, радіоелектронних, інформаційних та кібернетичних засобів. Характер ведення бойових

дій призвів до збільшення обсягу завдань щодо управління військами і значного ускладнення умов їхнього вирішення, вніс низку особливостей в управління військами.

До основних особливостей можна віднести підвищення значення фактора часу; збільшення обсягу робіт з управління військами; зростання вимог до обґрунтованості прийнятих рішень та наукового передбачення ходу і результатів бойових дій; ускладнення технічної бази управління; складність забезпечення стійкості та безперервності управління як до початку, так і в ході бойових дій в умовах безперервного впливу противника.

У таких умовах особливого значення набуває угруповання РТВ, яке виконує завдання з ведення радіолокаційної розвідки, виявлення ЗПН, видачі радіолокаційної інформації (РЛІ) споживачам та має розгалужену систему управління.

До загальних вимог до управління угрупованням РТВ належать оперативність, стійкість, безперервність, якість, скритність. Саме ці вимоги визначають здатність органів управління підтримувати управління угрупованням РТВ в динамічних і складних умовах під час бойового застосування.

Слід зазначити про наявність проблем, які ускладнюють управління. Однією з найбільш критичних є порушення безперервності управління. Вогневий вплив противника призводить до ураження пунктів управління (ПУ), засобів автоматизованого управління та вузлів зв'язку. У результаті може погіршитися безперервність управління підпорядкованими підрозділами. Ситуація ускладнюється ще й тим, що передача управління на запасний ПУ вимагає певного часу. Це безпосередньо відображається на здатності реагувати на повітряні загрози в реальному часі.

Іншою характерною проблемою є втрата стійкості управління. Ураження ПУ, засобів зв'язку та автоматизації, відсутність належного резервування та дублювання й призводять до того, що системі управління потрібен час для відновлення працездатності після ударів противника. Це, у свою чергу, впливає на можливості РТВ забезпечувати потрібні параметри радіолокаційного поля (РЛП) та видачу РЛІ на ПУ зенітних ракетних військ (ЗРВ) та ПУ авіації. Втрата управління, навіть на короткий час, створює ризик втрати контролю над окремими ділянками повітряного простору, що може мати наслідки для всієї системи ППО.

Не менш значущою проблемою є зниження оперативності прийняття рішень. Сучасні бойові дії характеризуються швидкою зміною обстановки. У таких умовах час ухвалення рішення обмежується хвилинами, а іноді й секундами. Перевантаженість оперативного складу, складність у роботі з автоматизованими системами управління та нестача достовірної інформації призводять до затримок у реагуванні, що суттєво знижує ефективність управління.

Суттєвою проблемою виступає затримка у доведенні команд та інформації. Активне застосування противником засобів РЕБ та засобів ураження може призвести до порушення або повного блокування каналів управління та каналів видачі РЛІ. Як наслідок, узгодженість дій угруповання РТВ та інших родів військ Повітряних Сил Збройних Сил України порушується, що знижує ефективність відбиття удару ЗПН.

Результати аналізу досвіду РТВ у відбитті збройної агресії російської федерації дозволяють сформулювати сукупність зовнішніх факторів, що впливають на ефективність управління. До них відносяться:

Розвідувальні можливості противника з викриття елементів системи управління угруповання РТВ. Активне застосування противником технічних засобів розвідки (радіотехнічної розвідки, радіорозвідки, оптичної та космічної розвідки), розвідувальних БпЛА та інших засобів, спрямоване на виявлення місць розташування ПУ, позицій радіотехнічних підрозділів, параметрів роботи засобів радіолокації та засобів зв'язку. Наслідками цього є:

виявлення ПУ та позицій підрозділів РТВ, що створює передумови для нанесення вогневого ураження;

вимушене переміщення радіотехнічних підрозділів спричиняє тимчасове погіршення параметрів РЛП та зниження якості видачі РЛІ;

розкриття параметрів роботи РЛС та засобів зв'язку, що підвищує ефективність впливу засобами РЕБ противника;

підвищення психологічного тиску на особовий склад унаслідок постійної загрози виявлення та подальшого ураження.

Вогневий вплив противника. Противник активно застосовує крилаті та балістичні ракети, ракетні війська та артилерію, авіаційні засоби ураження та ударні безпілотні літальні апарати для ураження ПУ, вузлів зв'язку та позицій радіотехнічних підрозділів. Наслідками таких дій є:

фізичне знищення ПУ та вузлів зв'язку, що може призвести до втрати управління підпорядкованими підрозділами;

виведення з ладу каналів зв'язку (дротових, радіорелейних, супутникових), що призводить до необхідності переходу на резервні канали та затримки доведення сигналів управління та видачі РЛІ;

знищення або пошкодження засобів автоматизованого управління, що призводить до переходу на менш ефективні способи управління; втрата часу на відновлення системи управління, передачі управління на запасні ПУ;

втрати серед особового складу, що унеможливує якісне управління навіть за наявності резервних засобів;

деморалізація та зниження психологічної стійкості особового складу після вогневого ураження або постійної загрози ударів.

Радіоелектронний вплив противника. Активне застосування засобів РЕБ спрямоване на придушення каналів зв'язку (радіо, супутникових, тропосферних, радіорелейних) та засобів радіолокації. Можливими наслідками для системи управління є:

втрата управління;

порушення обміну інформацією між ПУ, підрозділами, ускладнення доведення сигналів управління;

викривлення або блокування видачі РЛІ, що унеможливує формування достовірної інформації про повітряну обстановку;

перехоплення противником сигналів управління, розвідка каналів зв'язку та пеленгація засобів зв'язку, що підвищує загрозу нанесення вогневих ударів по ПУ, вузлам зв'язку;

примусшення до використання резервних або менш ефективних каналів управління, що знижує оперативність управління.

Висока динаміка та маневреність бойових дій. Сучасний характер війни передбачає швидкі зміни оперативної обстановки, інтенсивні переміщення військ, маневри як противника, так і своїх військ. Це створює низку проблем для СУ угрупованням РТВ, наслідками яких є:

часті переміщення ПУ та радіотехнічних підрозділів, що призводить до зниження рівня безперервності управління та погіршення параметрів РЛІ;

затримки у відновленні режимів роботи після розгортання або переміщення, що знижує готовність реагувати на загрози з повітря;

підвищене навантаження на особовий склад, який змушений швидко адаптуватися до нових умов на новій території і координувати дії в умовах дефіциту часу;

ускладнення взаємодії з іншими частинами (підрозділами) родів військ та видів ЗС України через постійні зміни розташування ПУ.

Таким чином, сукупність зовнішніх факторів, що зумовлена діями противника та застосуванням ним засобів розвідки, РЕБ, вогневого ураження та високоманевреним характером бойових дій суттєво впливає на ефективність управління угрупованням РТВ під час бойового застосування. Вони створюють зовнішнє середовище, до якого система управління має адаптуватися в реальному часі, забезпечуючи безперервність, живучість і оперативність. Врахування цих факторів при плануванні бойового застосування угруповання РТВ є необхідною умовою ефективного управління.

Ефективність управління також залежить від впливу внутрішніх факторів, які можуть містити технічні, організаційні, людські та інші аспекти, які безпосередньо визначають якість організації управління та спроможність оперативного складу реагувати на зміну обстановки. До них можна віднести:

Укомплектованість органів управління. Низька укомплектованість органів управління особовим складом є однією з головних причин зниження ефективності управління. Основними наслідками є:

перевантаження наявного оперативного складу, що знижує якість планування та виконання завдань;

складність забезпечення цілодобового чергування на ПУ;

недостатність повноцінного відпочинку оперативного складу, що призводить до підвищення кількості помилок та зниження концентрації.

Рівень підготовки органів управління. Недостатня професійна, спеціальна й психологічна підготовка оперативного складу ускладнює виконання завдань і призводить до ряду негативних наслідків:

помилки у плануванні та прийнятті рішень через брак досвіду та знань;

низька якість аналізу повітряної обстановки, що призводить до несвоєчасного реагування на загрози в повітряному просторі;

складнощі у використанні АСУ через недостатню підготовку;

затримки у доведенні сигналів управління в умовах дефіциту часу;

зниження психологічної стійкості в умовах вогневого та радіоелектронного впливу противника;

втрата часу та ініціативи через очікування команд від вищих штабів замість прийняття самостійних рішень у критичних ситуаціях.

Структура пунктів управління. Недосконалість структури негативно позначається на спроможності забезпечувати стійке управління. Основні наслідки полягають у такому:

надмірна централізація управління, що створює критичну залежність від одного ПУ;

відсутність захищених ПУ, що призводить до руйнувань та втрат оперативного складу;

концентрація особового складу в одному місці, що робить ПУ пріоритетною ціллю для впливу противника;

низька стійкість до втрат ключових офіцерів, що може призвести до втрати управління.

Засоби зв'язку та автоматизованого управління військами. Технічний стан, надійність і захищеність засобів зв'язку безпосередньо визначають можливості СУ. Їхня вразливість призводить до:

виведення з ладу каналів зв'язку через вогневий вплив, кібератаки противника, технічні несправності або дію засобів РЕБ противника та спричиняє втрату зв'язку між підрозділами, призводить до затримок у доведенні сигналів управління та РЛІ;

втрати достовірності інформації (часткові чи спотворені дані про повітряну обстановку);

підвищення навантаження на канали зв'язку, що знижує швидкість обміну інформацією;

обмеженої стійкості до кібервпливу і засобів РЕБ у застарілих системах;

ускладнення інтеграції даних від різних підрозділів через технічну несумісність засобів зв'язку та автоматизації.

Отже, ефективність управління угрупованням РТВ значною мірою визначається впливом як зовнішніх так і внутрішніх факторів, які охоплюють організацію управління, структуру створеної СУ, укомплектованість органів управління на їх навченість, структуру пунктів управління та особливості функціонування засобів зв'язку та автоматизованого управління військами. Саме від цих компонентів залежить здатність швидко реагувати на зміну обстановки, забезпечувати узгоджені дії, підтримувати безперервність і стійкість управління. Висока якість реалізації цих факторів підвищує адаптивність системи до бойових умов, тоді як їх недостатній рівень впливає на ефективність управління та зниження ефективності бойового застосування РТВ.

Обговорення

Виходячи з аналізу факторів, що суттєво впливають на ефективність управління угрупованням РТВ в оборонній операції ОУВ визначено, що основними з них є: розвідувальні можливості противника з викриття елементів системи управління угруповання РТВ, вогневий та радіоелектронний вплив противника, маневренний характер бойових дій в оборонній операції, укомплектованість та рівень підготовки органів управління, структура пунктів управління, наявність та характер застосування засобів зв'язку та автоматизованого управління військами.

Висновки

У статті розглянуто основні фактори, що впливають на ефективність управління угрупованням РТВ в оборонній операції ОУВ свідчить, що ефективність управління в значній мірі визначає результативність бойового застосування РТВ. Порушення безперервності, зниження стійкості та оперативності управління під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів призводять до втрати узгодженості дій підрозділів, зниження достовірності інформації про повітряну обстановку та несвоєчасного реагування на загрози з повітря. Управління виступає критичною умовою реалізації бойового потенціалу РТВ і його недоліки призводять до фактичного зниження боєздатності угруповання РТВ, що може вплинути на виконання оперативних завдань оборонної операції ОУВ.

Матеріали статті можуть бути корисними для фахівців, що займаються дослідженням систем управління. Подальшим напрямком дослідження

може бути удосконалення методики оцінювання ефективності управління угрупованням РТВ для врахування основних факторів, що впливають на ефективність управління угрупованням РТВ.

Список використаних джерел

1. Воєнно-історичний опис російсько-української війни: вип. 1–21 (лютий 2022 - листопад 2023) / Міністерство оборони України, Апарат Головнокомандувача Збройних Сил України, Генеральний штаб Збройних Сил України та Центр досліджень воєнної історії Збройних Сил України. - Київ, 2022–2023.
2. Трофимов І.М. Худов Г.В., Білецький С.С., Гризо А.А., Гладішук О.В. Особливості бойового застосування радіотехнічних військ Повітряних Сил України в ході російсько-української війни. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків: ХНУПС, 2024. № 2(55). С. 76–85. <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.08>.
3. NATO STANDARD AJP-3.3.5. Allied Joint Doctrine for Airspace Control, Edition B, Version 1, MAY 2013.
4. Лобанов А. А., Мозговий Р. А. До оцінювання ефективності управління військами (силами). Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ, 2019. № 3(36). С. 5–10. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-5-10>.
5. Елементи дослідження складних систем військового призначення: навчальний посібник / [О.М.Загорка, С. П Мосов, А. І. Сбітнев, П. І Стужук]. Київ: НАОУ, 2005. 100 с.
6. Кучеренко Ю. Ф., Носик А. М., Ткачов А. М., Шубін Є. В. Визначення ефективності функціонування системи управління військового призначення з врахуванням вагомості, своєчасності та якості виконання завдань у її підсистемах. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків: ХНУПС, 2019. № 4(62). С. 53–60. <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.62.07>.
7. Медведев, В.К, Дроник, А.М., Юфа, Є.А, Кондрацов, Д.Р. Фактори впливу на ефективність функціонування системи технічного забезпечення зв'язку, радіотехнічного забезпечення та автоматизації управління повітряного командування в операції оперативного угруповання військ (сил). Повітряна міць України. Київ: НУОУ, 2023. № 2(5). С. 69–73. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-69-73>
8. Волков А. Ф., Лезік О. В., Долина М. П., Корсунов С. І., Федченко С. І., Гуленов І. В. Аналіз, оцінка та шляхи підвищення ефективності системи управління підрозділами ППО Сухопутних військ за рахунок безперервності її функціонування. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків: ХНУПС, 2021. № 3(69). С. 7–15. DOI : 10.30748/zhups.2021.69.01.
9. Попов, С. Е., Пуховий О.В., Юфа, Є.А. Визначення сукупності показників для оцінювання ефективності функціонування системи управління угруповання радіотехнічних військ. Повітряна міць України. Київ: НУОУ, 2024. №2(7). С. 11–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-11-17>

Serhii Kresan

<https://orcid.org/0009-0009-4251-605X>

Oleksandr Pukhovyi (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-2863-3374>

Pavlo Shchypanskyi (Candidate of Military Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-0854-733X>

Vasyl Yasynetskyi (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-0643-3021>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

FACTORS AFFECTING THE MANAGEMENT EFFICIENCY OF RADIOTECHNICAL TROOPS IN THE DEFENSIVE OPERATION OF THE OPERATIONAL GROUP OF TROOPS (FORCES)

The experience of the russian-ukrainian war has confirmed that radiotechnical troops are the main source of information about the air situation. High-quality performance of radar reconnaissance tasks for enemy air attack means and the provision of radar information is impossible without effective management of radiotechnical troops in conditions of enemy fire and radio-electronic influence on the management system of radiotechnical troops. The article analyzes the main factors affecting the effectiveness management of radiotechnical troops in the defensive operation of an operational group of forces in modern combat conditions in order to determine their impact and possible consequences for the management system during the combat use of radiotechnical troops.

Keywords: radiotechnical troops, management, defensive operation, factor, continuity, stability, efficiency.

References

1. Voinno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny: vyp. 1–21 (liutyi 2022 - lystopad 2023) / Ministerstvo oborony Ukrainy, Aparat Holovnokomanduvacha Zbroinykh Syl Ukrainy, Heneralnyi shtab Zbroinykh Syl Ukrainy ta Tsentr doslidzhen voiennoi istorii Zbroinykh Syl Ukrainy. - Kyiv, 2022–2023.
2. Trofymov I.M. Khudov H.V., Biletskyi S.S., Hryzo A.A., Hladishchuk O.V. Osoblyvosti boiovoho zastosuvannya radiotekhnichnykh viisk Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy v khodi rosiisko-ukrainskoi viiny. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. Kharkiv: KhNUPS, 2024. № 2(55). С. 76–85. <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.08>.
3. NATO STANDARD AJP-3.3.5. Allied Joint Doctrine for Airspace Control, Edition B, Version 1, MAY 2013.
4. Lobanov A. A., Mozghovyi R. A. Do otsiniuvannya efektyvnosti upravlinnia viiskamy (sylamy). Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. Kyiv: NUOU, 2019. № 3(36). S. 5–10. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-5-10>.
5. Elementy doslidzhennia skladnykh system viiskovoho pryznachennia: navchalnyi posibnyk / [O.M.Zahorka, S. P Mosov, A. I. Sbitniev, P. I Stuzhuk]. Kyiv: NAOU, 2005. 100 s.
6. Kucherenko Yu. F., Nosyk A. M., Tkachov A. M., Shubin Ye. V. Vyznachennia efektyvnosti funktsionuvannya systemy upravlinnia viiskovoho pryznachennia z vrakhuvanniam vahomosti, svoiechasnosti ta yakosti vykonannya zavdan u yii pidsystemakh. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl. Kharkiv: KhNUPS, 2019. № 4(62). S. 53–60. <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.62.07>.
7. Medvediev, V.K., Dronyk, A.M., Yufa, Ye.A., Kondratsov, D.R. Faktory vplyvu na efektyvnist funktsionuvannya systemy tekhnichnoho zabezpechennia zv'iazku, radiotekhnichnoho zabezpechennia ta avtomatyzatsii upravlinnia povitrianoho komanduvannya v operatsii operativnoho uhrupovannya viisk (syl). Povitriana mits Ukrainy. Kyiv: NUOU, 2023. № 2(5). S. 69–73. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-69-73>
8. Volkov A. F., Lezik O. V., Dolyna M. P., Korsunov S. I., Fedchenko S. I., Hulenov I. V. Analiz, otsinka ta shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti systemy upravlinnia pidrozdilamy PPO Sukhoputnykh viisk za rakhunok bezperervnosti yii funktsionuvannya. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl. Kharkiv: KhNUPS, 2021. № 3(69). S. 7–15. DOI : 10.30748/zhups.2021.69.01.
9. Popov, S. E., Pukhovyi O.V., Yufa, Ye.A. Vyznachennia sukupnosti pokaznykiv dlia otsiniuvannya efektyvnosti funktsionuvannya systemy upravlinnia uhrupovannya radiotekhnichnykh viisk. Povitriana mits Ukrainy. Kyiv: NUOU, 2024. №2(7). S. 11–17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-11-17>

ПИТАННЯ БОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН ТА ПІДРОЗДІЛІВ ДЕРЖАВНОЇ АВІАЦІЇ УКРАЇНИ, ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ, РАДІОТЕХНІЧНИХ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК, ЗВ'ЯЗКУ, РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-20-25

УДК 358.4

Ткаченко Анатолій Володимирович
<https://orcid.org/000-0001-7316-5437>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

СТРАТЕГІЇ ВИБОРУ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ АВІАЦІЇ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПЛАНУВАННЯ ПОДОЛАННЯ ППО ПРОТИВНИКА НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КЛІТИННОГО АВТОМАТА

В статті представлено стратегії вибору маршруту польоту авіації для нанесення авіаційного удару в умовах протидії засобів протиповітряної оборони противника. Проводиться порівняльний аналіз ефективності трьох метаевристичних алгоритмів клітинних автоматів, мурашиного алгоритму та генетичного для генерації альтернативних маршрутів. Удосконалено метод вибору оптимальної стратегії польоту з числа альтернативних маршрутів шляхом ранжування маршрутів відносно трьох стратегій: мінімальної відстані, мінімального часу та мінімізації втрат повітряних суден. Застосування методу клітинного автомата дозволяє розрахувати всі значущі фактори оперативної обстановки, тобто клітин з “итрафним” коефіцієнтом, які відповідають відповідному рівню загроз повітряному судну. Результатом є вибір оптимального маршруту польоту авіації.

Ключові слова: маршрут польоту, планування польоту, авіаційний удар, клітинний автомат, подолання протиповітряної оборони противника.

Вступ

Оптимізація маршрутів польоту авіації (тактичних груп, підрозділів) включаючи як пілотовані так і безпілотні літальні апарати (БпЛА), має першочергове значення для ефективності бойових завдань. Нанесення зосереджених (групових) авіаційних ударів на території противника в операції (бойових діях) вимагають планування маршрутів польоту з подоланням системи протиповітряної оборони противника. Розв'язання цієї задачі полягає обґрунтуванні (розрахунку та вибору) найбільш оптимального маршруту подолання ППО противника, при якому протидія наземних ЗРК буде мінімальною. Критерієм оптимальності є мінімальна кількість успішних пусків (вражаючих пострілів) з боку засобів ППО противника.

Метою статті є обґрунтування стратегії вибору маршруту польоту авіації при моделюванні планування нанесення авіаційного удару в ході подолання засобів протиповітряної оборони противника.

Матеріали та методи

Наявні публікації підтверджують важливість порівняльного аналізу евристичних та метаевристичних методів для швидкого вирішення задачі пошуку маршруту в складних умовах оперативної обстановки, причому найбільший інтерес становлять саме метаевристичні (біо-

алгоритми) підходи. Досвід засвідчує, що дослідження активно ведуться у сфері оптимізації маршрутів як пілотованих так і безпілотних літальних апаратів. Зокрема, серед останніх робіт, цитованих у статті (2022–2025 рр.) [1, 2] розглядаються питання планування оптимальних маршрутів БпЛА, вдосконалення алгоритмів для задачі комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) з використанням мурашиної оптимізації [3] та визначення найкоротшого шляху для військових операцій [4, 5].

Таким чином, актуальність статті підтримується постійним пошуком більш адаптивних та швидких рішень для безпечного подолання протидії противника, які пропонує метод клітинного автомата.

Порівняльний аналіз метаевристичних алгоритмів для генерації маршрутів польоту авіації. Ефективність евристичних та мета евристичні методів для вирішення задачі пошуку маршруту польоту авіації на нанесення авіаційного удару на території противника вимагають швидких рішень у складних умовах оперативної обстановки. Найбільший інтерес представляють саме метаевристичні (біо-алгоритми) підходи.

Клітинні автомати (КА) дозволяють моделювати повітряний простір як тривимірну сітку (“решітчастий газ”), де кожна клітина має властивості, що відповідають загрозам (зони

ураження ЗРК, зони виявлення РТВ, рельєф місцевості, погодні умови, тощо). Маршрут будується шляхом вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації з умовами максимальної ймовірності успішного прольоту та мінімального відхилення від цілі.

Мурашиний алгоритм використовує імітацію поведінки мурах, що залишають феромонні сліди для пошуку найкоротших шляхів. В контексті авіаційного удару, “феромони” можуть позначати не тільки короткі, але й безпечні ділянки.

Генетичний алгоритм імітує еволюційні процеси (схрещування, мутація, відбір) для пошуку оптимальних рішень. Популяція “індивідів” (маршрутів) еволюціонує, відбираючи найкращі варіанти на основі “функції пристосованості”, яка може враховувати безпеку, час та витрати палива.

На відміну від більш абстрактних методів, таких як генетичні алгоритми або мурашині алгоритми, клітинні автомати забезпечують найбільш природне та інтуїтивне представлення бойового простору – моделювання повітряного простору як тривимірної сітки (“решітчастого газу”) дозволяє з високою точністю та гранулярністю враховувати гетерогенність середовища. Кожна клітина може містити вичерпну інформацію про загрози:

стаціонарні загрози: радіус дії та ймовірність ураження силами ППО противника;

динамічні загрози: положення рухомих засобів ППО противника.

природні перешкоди: рельєф місцевості, зони складних метеорологічних умов.

Такий підхід дозволяє легко інтегрувати дані з різних джерел розвідки, просто “накладаючи” їх на відповідні клітини сітки.

Для значення поведінкових властивостей КА з урахуванням

Завдання для визначення варіанту маршруту польоту повітряного судна зводиться до задачі пошуку найкоротшого шляху в тривимірному просторі із заданими властивостями, тобто пошуку найкоротшого шляху між двома вершинами, в якому мінімізується сума штрафу від відвідування областей з різними властивостями. При плануванні авіаційного удару по наземних цілях визначають кількість груп тактичного призначення, авіаційні засоби ураження і стратегії вибору маршруту польоту для кожних груп підрозділів бойового порядку авіації. Саме стратегії вибору маршруту польоту обираються за досвідом та знанням оперативної обстановки. Тому для груп тактичного призначення необхідно визначати свою стратегію пошуку альтернативних маршрутів.

Використання клітинного автомата реалізує окремий випадок методу випадкового пошуку, однак на відміну від існуючих методів проводиться імітація цілеспрямованого пошуку з випадковим механізмом зміни станів. Ця концепція дозволяє моделювати складну, глобальну поведінку, що виникає з локальних взаємодій, що робить її придатною для вирішення оптимізаційних задач,

таких як пошук найкоротшого або найбезпечнішого шляху в динамічному середовищі.

Еволюція станів цих клітин за локальними правилами визначає оптимальний маршрут.

Результати

За аналізом результатів бойових дій за досвідом російсько-української війни доцільно визначити стратегії вибору маршруту польоту, розрахованих на основі цього підходу:

1. Стратегія мінімізації відстані.

Це основна стратегія, що використовує фундаментальні властивості КА для пошуку найкоротшого шляху в дискретному просторі. Сутність полягає в пошуку маршруту з найменшою кількістю клітин (кроків) між точкою старту та призначенням (удару), оминаючи статичні та динамічні перешкоди. При цьому, повітряний простір моделюється як сітка. Клітинам присвоюються стани: “старт”, “фініш”, “перешкода”, “вільний простір”. На кожному такті часу (clock cycle) клітини, що є сусідніми до вже позначених як “досяжні”, також стають “досяжними”, якщо вони є вільними. Цей процес імітує поширення хвилі від точки старту. Еволюція триває, доки хвиля не досягне точки призначення (удару). Найкоротший шлях відновлюється рухом у зворотному напрямку, від фінішу до старту, по клітинах, які послідовно ставали “досяжними” на кожному попередньому кроці.

2. Стратегія уникнення динамічних перешкод (адаптивна модель).

Ця стратегія фокусується на безпеці, враховуючи, що повітряний простір є динамічним середовищем. Вона спрямована на зменшення часу знаходження в клітинах з динамічною перешкодою. Сутність цієї стратегії в прокладенні маршруту, який активно уникає зон з несприятливими або небезпечними умовами, що змінюються в часі. Такими зонами можуть бути зони виявлення РТВ, зони ураження ЗРВ, зони введення в бій винищувальної авіації противника, тощо. Клітини можуть мати стани, що відповідають динамічним перешкодам. Ці стани оновлюються на кожному кроці симуляції на основі зовнішніх даних. Правила переходу забороняють поширення “хвилі маршруту” через клітини, що мають стан динамічної перешкоди. Модель польоту ПС симулюючи модель поведінки “боязку” на кілька кроків уперед і прокладаючи маршрут, який залишатиметься безпечним протягом усього польоту.

3. Стратегія оптимізації за вартістю (ймовірнісний або неперервний КА).

Ця стратегія узагальнює поняття “кращий” маршрут, включаючи не лише відстань, а й інші фактори, такі як витрата палива, час польоту або рівень ризику. Знайти маршрут з найменшою сукупною “вартістю”, де кожна клітина має певну ціну прольоту через неї. Стан клітини може бути не просто дискретним маркером, а неперервним значенням, що представляє вартість (наприклад, очікувані витрати палива в цій зоні). Правила

переходу можуть бути ймовірнісними, де перехід у сусідню клітину залежить від її вартості. Наприклад, використовувати ймовірнісний КА, де вибір сусіда визначається ймовірністю, яка обернено пропорційна вартості польоту. Замість поширення простого маркера “досяжності”, КА поширює сукупну вартість шляху від старту. Маршрут відновлюється за градієнтом найменшої вартості.

4. Стратегія формування стійких коридорів (використання атракторів)

Ця стратегія спрямована не на пошук одного оптимального маршруту, а на визначення стабільних і безпечних “коридорів” для регулярних польотів. Суть стратегії у виявленні у просторово-часовій еволюції системи стабільні структури (атрактори), які представляють собою безпечні шляхи, стійкі до незначних збурень. КА запускається на велику кількість ітерацій з різними початковими умовами (наприклад, випадковим шумом, що імітує дрібні погодні збурення). Аналізується діаграма переходів станів системи. Цикли на цьому графіку відповідають періодичним, стабільним конфігураціям (атракторам). Ті послідовності клітин, які залишаються вільними у багатьох стабільних конфігураціях, формують надійні польотні коридори. Ця стратегія використовує здатність КА до самоорганізації та формування стійких патернів з простих правил, що дозволяє виявляти емерджентні властивості системи, такі як безпечні маршрути.

Алгоритм методу розв'язання завдання процесу вибору маршруту польоту авіації для нанесення авіаційного удару відповідно вибраній стратегії зображено на рис 1.

Алгоритм базується на моделі КА, де повітряний простір дискретизується у вигляді сітки (2D або 3D). Кожна клітина (комірка) сітки $S(i, j, k)$ має набір станів, що еволюціонують у часі за певними локальними правилами з метою пошуку оптимальної послідовності клітин від точки S (старт) до точки F (фініш), що відповідає одній із обраних стратегій.

На реалізацію стратегії можуть впливати глибина аналізу простору руху, принцип визначення штрафних функцій, принцип реалізації механізмів випадкового вибору напрямку руху і принцип формування правил переходу. При цьому, використання КА дозволяє реалізовувати одночасний пошук маршрутів для різних стратегій пошук або одночасний пошук маршрутів для кожної стратегії пошуку із урахуванням вже прокладених маршрутів.

Для кожного типу ПС (ведучого групи тактичного призначення):

1. Визначається злітна маса ПС відповідно варіанту бойового навантаження та заправки паливом.

2. Розбивається простір пошуку на елементи осередків клітинного автомату.

3. Визначається у відповідність кожному елементу характеристику простору і вигляді штрафу

за проліт через елементи простору призначеного ризику для польоту.

4. Представляємо політ ПС як послідовне відвідування осередків КА з різними властивостями відповідно до обраної стратегії.

5. Знаходимо маршрут польоту ПС, шлях з точки старту до точки нанесення авіаційного удару по наземній цілі та до точки фінішу (посадки).

На практиці необхідно розрахувати кілька варіантів для кожної з груп тактичного призначення. Можливим підходом для розрахунку альтернативного маршруту польоту ПС буде подвоєння штрафних елементів, через які проходить раніше розрахований маршрут.

Обговорення

Отже, метод КА дозволяє моделювати повітряний простір як тривимірну сітку, де кожна клітина може містити вичерпну інформацію про загрози, включаючи стаціонарні та динамічні загрози, а також природні перешкоди. Запропоновані чотири основні стратегії вибору маршруту польоту авіації при моделюванні планування подолання ППО противника. Обмеженість врахування всіх факторів обстановки, обмеженість ресурсів в ході прийняття рішення на авіаційний удар має бути не суто теоретичним, а спрямованим на конкретні управлінські рішення. Нижче наведено основні напрямки їх впровадження.

1. Забезпечення оперативної інтеграції даних розвідки про динамічні загрози в реальному часі в модель КА.

Стратегія уникнення динамічних перешкод вимагає, щоб стани клітин, що відповідають динамічним загрозам (положення рухомих засобів ППО), оновлювалися на кожному кроці симуляції на основі даних розвідки з декількох джерел. Важливо визначити, які механізми (протоколи, апаратне забезпечення) необхідні для високошвидкісної інтеграції розвідувальних даних, щоб модель КА могла підтримувати адаптивну поведінку “боязку” та забезпечувати безпечний проліт пілотованих та безпілотних літальних апаратів у швидкозмінному бойовому середовищі.

2. Удосконалення функції “штрафу” та критерії ранжування маршрутів для точного відображення багатокритеріальної оптимізації в умовах багатоешелонованої ППО.

Завдання пошуку маршруту зводиться до багатокритеріальної задачі оптимізації, де мінімізується сума “штрафу” від відвідування небезпечних областей. Критерієм оптимальності є мінімальна кількість успішних пусків з боку засобів ППО. Необхідно визначити методику точного визначення штрафного коефіцієнта для елементів простору призначеного ризику, а також, як у рамках стратегії оптимізації за вартістю ефективно зважувати такі фактори, як ризик ураження, час польоту та витрата палива, щоб точно ранжувати альтернативні маршрути, отримані шляхом незначної зміни вагових коефіцієнтів.

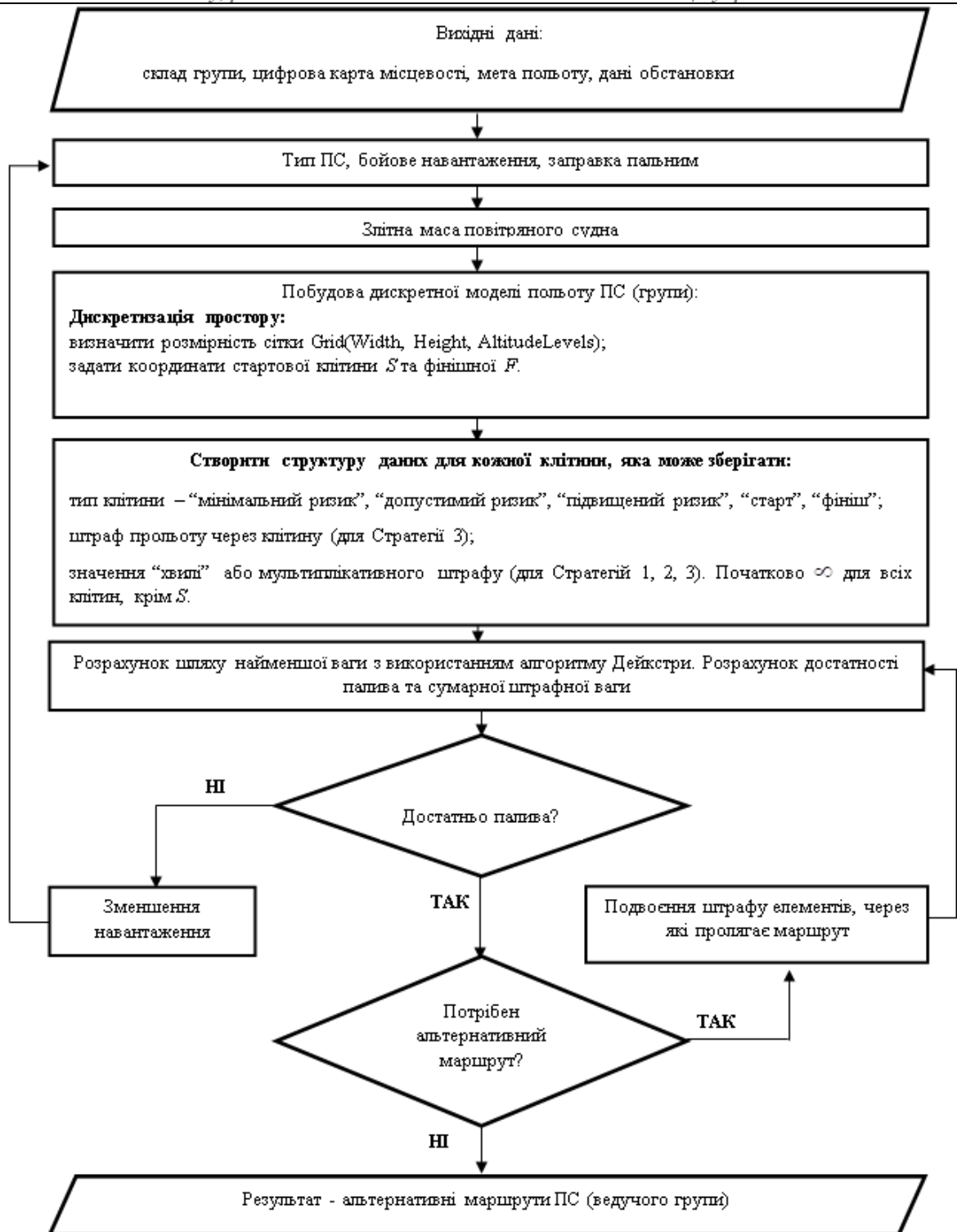


Рисунок 1 – Структура методу визначення вибору маршруту польоту авіації на нанесення авіаційного удару відповідно вибраній стратегії

3. Технічні засоби та архітектурні рішення для паралельної реалізації всіх чотирьох стратегій КА з метою швидкого розрахунку сімейства альтернативних маршрутів для груп тактичного призначення.

Використання КА забезпечує високу швидкість розрахунку за рахунок паралелізму. Необхідність розрахунку кількох варіантів для кожної з груп тактичного призначення, а також можливість

одночасного пошуку маршрутів для різних стратегій. Необхідне впровадження обчислювальні архітектури та програмних інструментів (Wolfram Mathematica та MS Excel в останніх дослідженнях) для швидкої та паралельної генерації сімейства альтернативних маршрутів відповідно до всіх чотирьох стратегій [8–11].

4. Інтегрувати стратегію формування стійких коридорів (атракторів) у планування, враховуючи необхідність швидкої адаптації до змін загроз.

Стратегія формування стійких коридорів спрямована на виявлення стабільних і безпечних шляхів, стійких до незначних збурень. Чи можливо практично використовувати стабільні структури (атрактори) для тактичної авіації, коли бойове середовище є високо динамічним та слугувати основою для прокладання шляхів, які потім коригуються в реальному часі за допомогою адаптивної стратегії (уникнення динамічних перешкод), і як часто має проводитися аналіз діаграми переходів станів для оновлення цих коридорів?

Висновки

У статті розроблено, проаналізовано та обґрунтовано чотири стратегії, які базуються на моделі КА для вибору оптимального маршруту польоту кожній групі бойового порядку авіації при плануванні подолання засобів протиповітряної оборони противника. Клітинні автомати підтверджують найкращий баланс між реалістичністю моделювання бойового простору, високою швидкістю розрахунку завдяки паралелізму, винятковою адаптивністю до загроз та гнучкістю у реалізації, порівняно з мурашиним та генетичним алгоритмами. На відміну від методів, які збігаються до одного-єдиного оптимального рішення, застосування клітинного автомата дозволяє генерувати сімейство альтернативних маршрутів для подальшого аналізу, вибору що досягається шляхом зміни вагових коефіцієнтів у функції “штрафу”.

Результати цієї статті мають практичне значення і можуть бути корисними для фахівців з планування авіаційних ударів тактичних груп, підрозділів на території противника, включаючи як пілотовані, так і безпілотні літальні апарати.

Список використаних джерел

1. Полуйко О.М., Онипченко П.М., Тимошенко О.В., Корецький В.Я. Методика оптимізації маршруту подолання ППО противника підрозділами тактичної авіації. Системи озброєння і військова техніка, випуск 4 (56), 2018. – С. 48–51. DOI: 10.30748/soivt.2018.56.07. Режим доступу: <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.07>.
2. Семенюта М.Ф., Якименко С.М., Осадчий С.І. Оптиміальне планування маршрутів безпілотних літальних апаратів для ефективного покриття заданої території. Центральнотериторіальний науковий вісник. Технічні науки, випуск 12 (43, ч. І), 2025. – С. 31–43. Режим доступу: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.31-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43).
3. Vorotnikov V., Gumenyuk I., Pozdniakov P. Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. Technology Audit and Production Reserves. 4/2(36), 2023, 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.
4. Удодова О., Вовчук С. Оптимізація найкоротшого маршруту для військових операцій за допомогою MS

Excel та Wolfram Mathematica. Фізико-математична освіта, випуск 2(40), 2025. – С. 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Режим доступу: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.

5. Hulianytskyi L.F., Rybalchenko O. V. Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. Kibernetika ta kompiuterni tekhnologii, (3) 2023, 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Режим доступу: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.

6. Воробйов С.С., Павленко М.А., Хлебніков С. Ю., Гладішев М. Г. Використання кліткового автомату у методі вибору варіанту маршруту польоту ударних літаків щодо ураження наземних цілей. Системи озброєння і військова техніка, випуск 1 (53), 2018. – С. 84–90. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2018_1_14.

7. Никифоров О.В., Смик С. І., Мартиненко П. М., Ситник Ю.Б., Могилащенко А.С. Розрахунок тактичного радіуса дії літаків з турбореактивною силовою установкою при скороченому наборі вихідних даних. Системи озброєння і військова техніка, випуск 4 (68), 2021. – С. 40–48. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.06. Режим доступу: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.06>.

8. Удодова О., Вовчук С. Оптимізація найкоротшого маршруту для військових операцій за допомогою MS Excel та Wolfram Mathematica. Фізико-математична освіта, випуск 2(40), 2025. – С. 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Режим доступу: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.

9. Hulianytskyi L.F., Rybalchenko O. V. Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. Kibernetika ta kompiuterni tekhnologii, (3) 2023, 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Режим доступу: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.

10. Costley A., Christensen R. C., Leishman R., Droge G. N. Analytical aircraft state and imu signal generator from smoothed reference trajectory / IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems/ 58(3), 2022, 2517–2530. DOI: 10.1109/TAES.2021.3090740. Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3090740>.

11. Murugananthan V., Rehan M. Y. E. S., Srinivasan R., Kavitha M., Kavitha R. Traveling Salesman Problem with Ant Colony Optimization. In 2-nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). DOI: 10.1109/ICECAA58104.2023.10212262. Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/ICECAA58104.2023.10212262>.

12. Uddin F., Riaz N., Manan A., Mahmood I., Song O.-Y., Malik A. J., Abbasi A. A. An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. Applied Sciences, 13(12), 2023. DOI: 10.3390/app13127339. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/app13127339>.

13. Бабич В., Костенко А., Плеша В., Плеша М., Хмілярчук Л. Задача пошуку найкоротшого шляху: порівняльний аналіз основних алгоритмів. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, (2), 2023, 99–106. DOI: 10.32782/IT/2023-2-12. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-12>.

14. Vorotnikov V., Gumenyuk I., Pozdniakov P. Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. Technology Audit and Production Reserves. 4/2(36), 2023, 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Режим доступу: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.

Anatolii Tkachenko

<https://orcid.org/000-0001-7316-5437>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A STRATEGY FOR SELECTING AVIATION FLIGHT ROUTES FOR OVERCOMING ENEMY AIR DEFENSES BASED ON CELLULAR AUTOMATON MODELING

The article presents strategies for selecting aviation flight routes for conducting an air strike under conditions of counteraction by enemy air defense assets. A comparative analysis of the effectiveness of three metaheuristic algorithms—cellular automata, ant colony algorithm, and genetic algorithm—is conducted for generating alternative routes. A method for selecting the optimal flight strategy from alternative routes has been improved by ranking the routes relative to three strategies: minimum distance, minimum time, and minimization of aircraft losses. The application of the cellular automaton method allows for the calculation of all significant factors of the operational situation, i.e., cells with a “penalty” coefficient, which correspond to the respective threat level to the aircraft. The result is the selection of the optimal aviation flight route.

Key words: flight route, flight planning, airstrike, cellular automaton, suppression of enemy air defense.

References

1. Poluiko, O.M., Onypchenko, P.M., Tymoshenko, O.V., & Koretskyi, V.Ia. (2018). Methodology for optimizing the route for tactical aviation units to penetrate enemy air defense. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, 4(56), 48–51. DOI: 10.30748/soivt.2018.56.07. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.56.07>.
2. Semeniuta, M.F., Yakymenko, S.M., & Osadchyi, S.I. (2025). Optimal route planning for unmanned aerial vehicles for effective coverage of a given territory. *Tsentralnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences]*, 12 (43, part I), 31–43. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43. Available at: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.31-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.31-43).
3. Vorotnikov, V., Gumenyuk, I., & Pozdniakov, P. (2023). Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. *Technology Audit and Production Reserves*, 4/2(36), 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Available at: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.
4. Udodova, O., & Vovchuk, S. (2025). Optimization of the shortest route for military operations using MS Excel and Wolfram Mathematica. *Fyzyko-matematychna osvita [Physics and Mathematics Education]*, 2(40), 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Available at: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.
5. Huliannytskyi, L.F., & Rybalchenko, O.V. (2023). Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. *Kibernetyka ta kompiuterni tekhnolohii [Cybernetics and Computer Technologies]*, (3), 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Available at: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.
6. Vorobiov, Ye.S., Pavlenko, M.A., Khliebnikov, Ye.Iu., & Hladyshev, M.H. (2018). Using a cellular automaton in the method of selecting a flight route option for strike aircraft to engage ground targets. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, 1(53), 84–90. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2018_1_14.
7. Nykyforov, O.V., Smyk, S.I., Martynenko, P.M., Sytnyk, Yu.B., & Mohylatenko, A.S. (2021). Calculation of the tactical radius of action for aircraft with turbojet engines using a reduced set of input data. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Systems of Arms and Military Equipment]*, 4(68), 40–48. DOI: 10.30748/soivt.2021.68.06. Available at: <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.06>.
8. Udodova, O., & Vovchuk, S. (2025). Optimization of the shortest route for military operations using MS Excel and Wolfram Mathematica. *Fyzyko-matematychna osvita [Physics and Mathematics Education]*, 2(40), 57–62. DOI: 10.31110/fmo2025.v40i2-08. Available at: <https://doi.org/10.31110/fmo2025.v40i2-08>.
9. Huliannytskyi, L.F., & Rybalchenko, O.V. (2023). Route optimization in planning missions of hybrid transport systems “drone + vehicle”. *Kibernetyka ta kompiuterni tekhnolohii [Cybernetics and Computer Technologies]*, (3), 44–58. DOI: 10.34229/2707-451X.23.3.4. Available at: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.23.3.4>.
10. Costley, A., Christensen, R. C., Leishman, R., & Droge, G. N. (2022). Analytical aircraft state and imu signal generator from smoothed reference trajectory. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(3), 2517–2530. DOI: 10.1109/TAES.2021.3090740. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3090740>.
11. Murugananthan, V., Rehan, M. Y. E. S., Srinivasan, R., Kavitha, M., & Kavitha, R. (2023). Traveling Salesman Problem with Ant Colony Optimization. In 2-nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). DOI: 10.1109/ICECAA58104.2023.10212262. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICECAA58104.2023.10212262>.
12. Uddin, F., Riaz, N., Manan, A., Mahmood, I., Song, O.-Y., Malik, A. J., & Abbasi, A. A. (2023). An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. *Applied Sciences*, 13(12), 7339. DOI: 10.3390/app13127339. Available at: <https://doi.org/10.3390/app13127339>.
13. Babych, V., Kostenko, A., Plesha, V., Plesha, M., & Khmiliarchuk, L. (2023). The shortest path problem: a comparative analysis of main algorithms. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 99–106. DOI: 10.32782/IT/2023-2-12. Available at: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-12>.
14. Vorotnikov, V., Gumenyuk, I., & Pozdniakov, P. (2023). Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem. *Technology Audit and Production Reserves*, 4/2(36), 44–49. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.108537. Available at: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-26-32

УДК.355.424.4

Новіков Олег Володимирович

<https://orcid.org/0009-0000-3493-8214>

Глоба Олександр Володимирович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-1423-8365>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОБГРУНТУВАННЯ СКЛАДУ УГРУПОВАННЯ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК

В статті запропонований удосконалений підхід до оцінювання вогневих можливостей угруповання зенітних ракетних військ при протидії різним типам повітряних загроз. Метою дослідження стало удосконалення методики обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ, яка враховує додаткові фактори, а саме, одночасний вплив аеродинамічних цілей на середніх і великих висотах, цілей, що діють по балістичним траєкторіям, а також аеродинамічних цілей і крилатих ракет на малих і гранично малих висотах. На відміну від існуючого порядку розрахунку, запропоновано чотири категорії, що забезпечує більш точне обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ. Результати дозволяють відокремлювати найбільш небезпечні варіанти складу засобів повітряного нападу на ранніх етапах планування, прогнозувати їх вплив на ефективність угруповання та формувати практичні рекомендації щодо оптимізації складу угруповання зенітних ракетних військ. Запропонована методика має практичну цінність для розрахунку вогневих можливостей під час планування бойових дій.

Ключові слова: угруповання зенітних ракетних військ, вогневі можливості, удосконалена методика, засоби повітряного нападу, протиповітряна оборона, система протиповітряної оборони.

Вступ

З початку повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну 24 лютого 2022 року характер збройної боротьби набув нових рис. Застосування високоточної зброї, масованих комбінованих ударів та безпілотних платформ трансформувало уявлення про ефективну протиповітряну оборону в умовах сучасної війни [1]. Агресор, з перших днів війни намагався досягти переваги в повітрі, здійснюючи удари по критичній інфраструктурі, центрах управління, об'єктах військово-промислового комплексу, складах, арсеналах, аеродромах та пунктах базування.

Цілеспрямоване та масштабне застосування крилатих ракет повітряного, морського і наземного базування, дронів-камікадзе та аеробалістичних ракет поставило перед системою протиповітряної оборони України складне завдання – одночасно та ефективно протидіяти різним типам загроз, які діють у широкому діапазоні висот, швидкостей і радіолокаційної помітності. Зенітні ракетні війська Повітряних Сил Збройних Сил України виявилися та протягом останніх трьох років залишалися головним елементом протидії цим загрозам.

Попри перевагу противника у кількості та номенклатурі засобів повітряного нападу, Україні вдалося не тільки зберегти існуючу систему протиповітряної оборони, а й наростити її потенціал. У цьому контексті особливого значення набуло створення угруповань зенітних ракетних військ змішаного складу, які одночасно використовують зразки озброєння радянського (С-300П, С-300В1, С-125, БУК-М1) та західного (PATRIOT, NASAMS,

IRIS-T, SAMP-T та ін.) виробництва.

Використання зенітних ракетних комплексів різних поколінь у єдиному бойовому порядку дозволило компенсувати недоліки окремих систем за рахунок переваг інших [2,3].

Зміна тактики ворога – від спроб знищення засобів протиповітряної оборони в перші дні війни до систематичних хвильових атак на критичну інфраструктуру та військові об'єкти в подальшому засвідчила необхідність переосмислення окремих принципів бойового застосування зенітних ракетних військ. Особливо небезпечними стали комбіновані удари, під час яких одночасно застосовуються Shahed-136, X-101/555, Калібр, Іскандер та північнокорейські балістичні ракети серії KN-23 (або Hwansong-11 Ga) [4-13]. Вони не лише переважтажують систему виявлення й супроводження цілей, а й сприяють розкриттю бойових позицій зенітних ракетних комплексів, що в умовах нестачі боєкомплекту може мати критичні наслідки.

Оцінка досвіду бойових дій, набутих у ході відбиття сотень ударів з повітря протягом 2022-2025 років [4-13], дає змогу виявити ключові фактори, що впливають на ефективність бойового застосування угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу. Серед них: склад і характер дій противника, особливості рельєфу місцевості, характер завдань, тактико-технічні характеристики зенітних ракетних комплексів, рівень підготовки особового складу, стан управління, наявність прикриття, а також ступінь адаптації до сучасних технологій [14].

Постійна зміна складу сил і засобів повітряного нападу між ударами також потребує проведення

відповідних розрахунків під час оцінювання вогневих можливостей угруповання зенітних ракетних військ [1,15,16]. Врахування таких особливостей надає підстав до більш ґрунтовного прийняття рішень.

Тому, **метою статті** стало розкриття основних положень удосконаленої методики обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ.

Матеріали та методи

Основним показником ефективності бойових дій угруповання зенітних ракетних військ під час їх планування є відношення математичного очікування кількості знищених засобів повітряного нападу до досягання рубежів виконання ними завдань до прогнозованої кількості цілей, що можуть увійти в зону вогню угруповання зенітних ракетних військ [2,17-19]. Ефективність бойових дій розраховується за формулою:

$$E = \frac{M_{\text{ц}}}{N_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

де $M_{\text{ц}}$ – математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника;

$N_{\text{ц}}$ – кількість засобів повітряного нападу противника, які приймають участь в ударі [2].

Математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника угрупованням зенітних ракетних військ визначається за формулою:

$$M_{\text{ц}} = M_{\text{ц}}^{\text{свв}} \cdot \gamma_{\text{свв}} + M_{\text{ц}}^{\text{мв}} \cdot \gamma_{\text{мв}}, \quad (2)$$

де $M_{\text{ц}}^{\text{свв}}$ – математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника, що діють на середніх і великих висотах (1–12 км);

$M_{\text{ц}}^{\text{мв}}$ – математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника, що діють на малих та гранично малих висотах (0-1000 м);

$\gamma_{\text{свв}} = \frac{N_{\text{ц}}^{\text{свв}}}{N_{\text{ц}}}$ – частка засобів повітряного нападу, що діє на середніх і великих висотах;

$\gamma_{\text{мв}} = \frac{N_{\text{ц}}^{\text{мв}}}{N_{\text{ц}}}$ – частка засобів повітряного нападу, що діє на малих і гранично малих висотах [17].

Під час аналізу існуючої методики виявлені прогалини в підходах до визначення складу угруповання. Існуюча методика враховує тільки базові технічні характеристики і типові варіанти застосування засобів повітряного нападу на середніх та великих, а також на малих і гранично малих висотах [4,20].

З розрахунку, що пропонується за формулою (2) видно, що недостатньо детально враховуються

додаткові фактори, які набули актуальності, такі як: застосування противником ракет по балістичній траєкторії та застосування крилатих ракет, які мають меншу відбиваючу поверхню, на гранично малих висотах з огинанням рельєфу місцевості, тим самим значно підвищуючи математичне очікування кількості знищених цілей. Через це прогнозовані показники ефективності угруповань зенітних ракетних військ у ряді реальних сценаріїв виявляються занадто оптимістичними та непридатними для прийняття рішень у бойовій обстановці [14].

Тому, для більш якісного планування набуло актуальності питання удосконалення методики визначення складу змішаних угруповань зенітних ракетних військ, яка дозволить більш ґрунтовно оцінити його ефективність [21]. Методика повинна включати кількісну та якісну оцінку впливу саме крилатих ракет на малих висотах, а також кількісну та якісну оцінку впливу засобів повітряного нападу, які діють по балістичним траєкторіям.

Результати

Визначення математичного очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника угрупованням зенітних ракетних військ пропонується розраховувати наступним чином:

$$M_{\text{ц,гр}} = \gamma_{\text{свв}} \cdot M_{\text{ц}}^{\text{свв}} + \gamma_{\text{мв}} \cdot M_{\text{ц}}^{\text{мв}} + \gamma_{\text{бц}} \cdot M_{\text{ц}}^{\text{бц}} + \gamma_{\text{кр}} \cdot M_{\text{ц}}^{\text{кр}}, \quad (3)$$

де $M_{\text{ц}}^{\text{бц}}$ – математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника, що діють по балістичним траєкторіям (від 12 км до 40 км);

$M_{\text{ц}}^{\text{кр}}$ – математичне очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника типу крилата ракета, що діють на малих та гранично малих висотах (від 0 км до 1 км);

$\gamma_{\text{бц}} = \frac{N_{\text{ц}}^{\text{бц}}}{N_{\text{ц}}}$ – частка засобів повітряного нападу, що діють по балістичним траєкторіям;

$\gamma_{\text{кр}} = \frac{N_{\text{ц}}^{\text{кр}}}{N_{\text{ц}}}$ – частка засобів повітряного нападу противника типу крилата ракета, що діють на малих та гранично малих висотах.

При цьому, головною вимогою залишається те, що:

$$\gamma_{\text{свв}} + \gamma_{\text{мв}} + \gamma_{\text{бц}} + \gamma_{\text{кр}} = 1. \quad (4)$$

На рис. 1 зображена блок-схема удосконаленої методики обґрунтування складу змішаного угруповання зенітних ракетних військ яка пропонується.

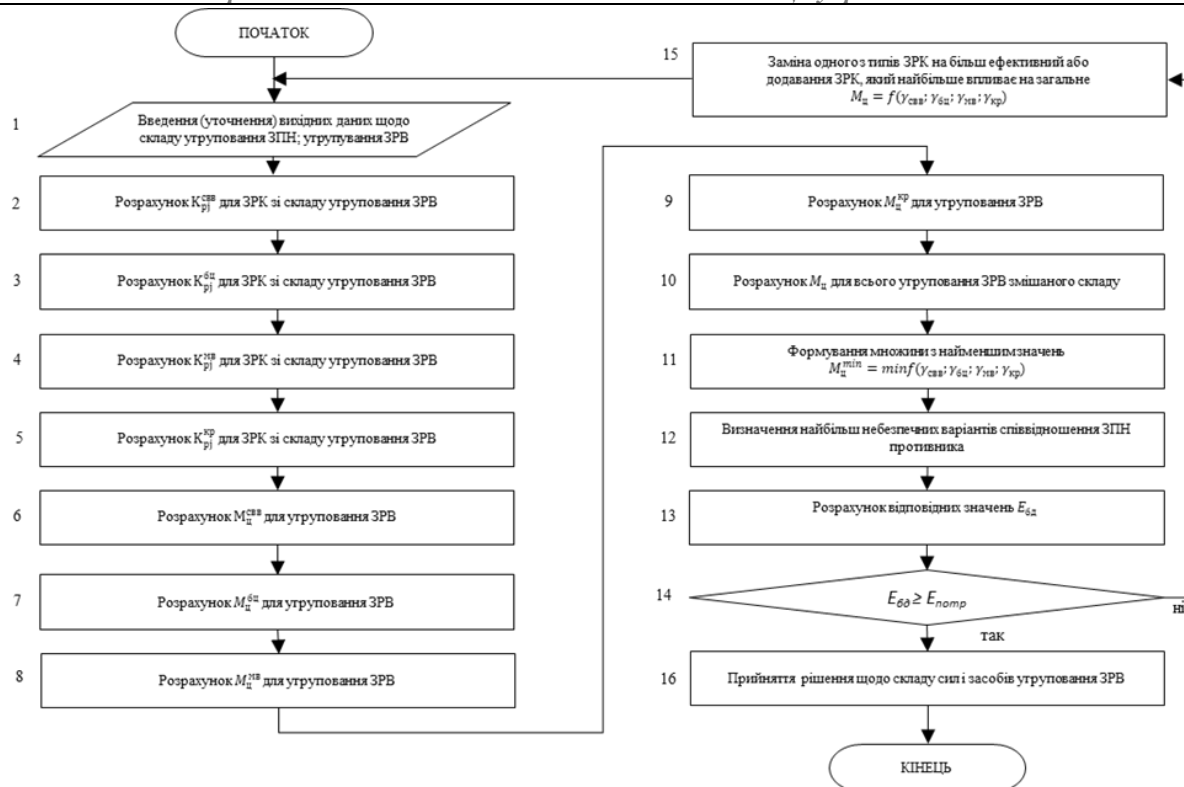


Рисунок 1 – Блок-схема удосконаленої методики обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ

Розглянемо порядок функціонування методики обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ в умовах обмежених вогневих можливостей під час прикриття важливих державних об'єктів, блок-схема якої зображена на рис. 1.

Блок 1. Введення (уточнення) вихідних даних.

В блоці формуються вихідні дані щодо:

складу угруповання засобів повітряного нападу, кількості, стану та бойових можливостей угруповання зенітних ракетних військ, ставляться завдання щодо знищення певних типів засобів повітряного нападу;

після аналізу отриманих вихідних даних проводиться їх узагальнення.

Блок 2. Розрахунок коефіцієнту реалізації бойових можливостей по аеродинамічним цілям на середніх і великих висотах за кожен підрозділ зі складу угруповання зенітних ракетних військ. Розрахунок проводиться за формулою:

$$K_{pj}^{свв} = K_{учj}^{свв} \cdot K_{бгj} \cdot K_{упрj} \cdot K_{мj}, \quad (5)$$

де $K_{учj}^{свв(бц, мв, кр)}$ – коефіцієнт участі зенітного ракетного підрозділу j -го типу у відбитті удару;

$K_{бгj}$ – коефіцієнт бойової готовності зенітного ракетного підрозділу j -го типу;

$K_{упрj}$ – коефіцієнт ефективності управління зенітного ракетного підрозділу j -го типу;

$K_{мj}$ – коефіцієнт впливу маневру засобів повітряного нападу

противника на вогневі можливості зенітного ракетного підрозділу j -го типу;
 j – тип зенітного ракетного комплексу зі складу угруповання зенітних ракетних військ.

Блок 3. Розрахунок коефіцієнту реалізації бойових можливостей по цілям по балістичній траєкторії на середніх і великих висотах за кожен підрозділ зі складу угруповання зенітних ракетних військ. Розрахунок проводиться за формулою:

$$K_{pj}^{бц} = K_{учj}^{бц} \cdot K_{бгj} \cdot K_{упрj} \cdot K_{мj}. \quad (6)$$

Врахування $K_{мj}$ доречно, враховуючи те, що противник застосовує північнокорейські балістичні ракети серії KN-23 (або Hwansong-11 Ga), які здатні маневрувати в польоті, що дозволяє їй ухилятися від систем протиповітряної оборони, для цього використовуються керма в соплі двигуна.

Блок 4. Розрахунок коефіцієнту реалізації бойових можливостей по аеродинамічним цілям на малих і гранично малих висотах за кожен підрозділ зі складу угруповання зенітних ракетних військ. Розрахунок проводиться за наступною формулою:

$$K_{pj}^{мв} = K_{учj}^{мв} \cdot K_{бгj} \cdot K_{упрj} \cdot K_{мj} \cdot K_{мвj}, \quad (7)$$

де $K_{мвj}$ – коефіцієнт впливу на вогневі можливості зенітного ракетного підрозділу j -го типу дій засобів повітряного нападу противника на малих і гранично малих висотах.

Блок 5. Розрахунок коефіцієнту реалізації бойових можливостей по крилатим ракетах на малих і гранично малих висотах за кожен підрозділ зі складу угруповання зенітних ракетних військ. Розрахунок проводиться за формулою:

$$K_{pj}^{кр} = K_{учj}^{кр} \cdot K_{бгj} \cdot K_{упрj} \cdot K_{mj} \cdot K_{мвj} \quad (8)$$

Блок 6. Визначення математичного очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника для угруповання зенітних ракетних військ, що діють на середніх і великих висотах. Розрахунок проводиться за формулою:

$$M_{ц}^{свв} = \sum_{j=1}^m (K_{pj}^{свв} \cdot K_{dj} \cdot P_{nj}^{свв} \cdot N_{стрj}^{свв}), \quad (9)$$

де K_{dj} – кількість зенітних ракетних підрозділів j -го типу угруповання зенітних ракетних військ;
 $P_{nj}^{свв(бц,мв,кр)}$ – імовірність знищення засобів повітряного нападу за одну стрільбу зенітного ракетного підрозділу j -го типу в конкретних умовах обстановки;
 $N_{стрj}^{свв(бц,мв,кр)}$ – кількість стрільб зенітного ракетного підрозділу j -го типу по засобам повітряного нападу в припущенні, що вони діють в конкретних умовах обстановки.

Блок 7. Визначення математичного очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника для угруповання зенітних ракетних військ, що діють по балістичній траєкторії. Розрахунок проводиться за формулою:

$$M_{ц}^{бц} = \sum_{j=1}^m (K_{pj}^{бц} \cdot K_{dj} \cdot P_{nj}^{бц} \cdot N_{стрj}^{бц}). \quad (10)$$

Блок 8. Визначення математичного очікування кількості знищених засобів повітряного нападу противника для угруповання зенітних ракетних військ, що діють на малих і гранично малих висотах. Розрахунок проводиться за формулою:

$$M_{ц}^{мв} = \sum_{j=1}^m (K_{pj}^{мв} \cdot K_{dj} \cdot P_{nj}^{мв} \cdot N_{стрj}^{мв}). \quad (11)$$

Блок 9. Визначення математичного очікування кількості знищених крилатих ракет противника для угруповання зенітних ракетних військ, що діють на малих і гранично малих висотах. Розрахунок проводиться за формулою:

$$M_{ц}^{кр} = \sum_{j=1}^m (K_{pj}^{кр} \cdot K_{dj} \cdot P_{nj}^{кр} \cdot N_{стрj}^{кр}) \quad (12)$$

Блок 10. Визначення математичного очікування кількості знищених засобів повітряного нападу

противника, для всього угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу. Розраховується за формулою:

$$M_{ц} = \sum_{j=1}^m (K_{pj}^{свв(мв,бц,кр)} \cdot K_{dj} \cdot P_{nj}^{свв(мв,бц,кр)} \cdot N_{стрj}^{свв(мв,бц,кр)}). \quad (13)$$

Блок 11. Формування множини з найменшим значенням математичного очікування:

$$M_{ц}^{min} = \min f(\gamma_{свв}; \gamma_{бц}; \gamma_{мв}; \gamma_{кр}). \quad (14)$$

Блок 12. Узагальнення отриманих результатів та визначення найбільш небезпечних варіантів співвідношення засобів повітряного нападу противника, які можуть бути застосовані в ударі. Приклад показаний на рис. 2.

Блок 13. З отриманих найбільш небезпечних варіантів співвідношення засобів повітряного нападу вираховуємо відповідні значення ефективності ведення бойових дій за формулою:

$$E = \frac{M_{ц}}{N_{ц}}. \quad (15)$$

Блок 14. Порівнюємо значення отриманої ефективності з потрібною:

$$E_{бд} \geq E_{потр}. \quad (16)$$

Блок 15. Якщо результат не задовольняє рівняння в блоці 14 – готуємо пропозиції щодо заміни одного з типів зенітних ракетних комплексів на більш ефективний або на додавання зенітного ракетного комплексу, який найбільше впливає на загальне математичне очікування:

$$M_{ц} = f(\gamma_{свв}; \gamma_{бц}; \gamma_{мв}; \gamma_{кр}). \quad (17)$$

Після чого повторюємо процедуру з першого блоку, уточнивши вхідні дані щодо складу угруповання зенітних ракетних військ.

Блок 16. Якщо результат задовольняє рівняння в блоці 14 – приймається рішення щодо складу сил і засобів угруповання зенітних ракетних військ.

За результатами розрахунку, проведеного для випадку коли

$$\gamma_{свв} = \gamma_{мв} = 0,5, \quad (18)$$

пропонується приклад застосування удосконаленої методики.

Обговорення

Так на рис. 2 зображені три графіки. Графік №1 відображає значення $M_{ц}$ за існуючою методикою оцінювання. Він виглядає незмінним, проте, насправді він змінюється в залежності від деталізації складу засобів повітряного нападу після розрахунку $M_{ц}$ за удосконаленою методикою, як це зображено на графіку №2. За допомогою графіка №2 наглядно показано формування множини з найменшим значенням математичного ураження

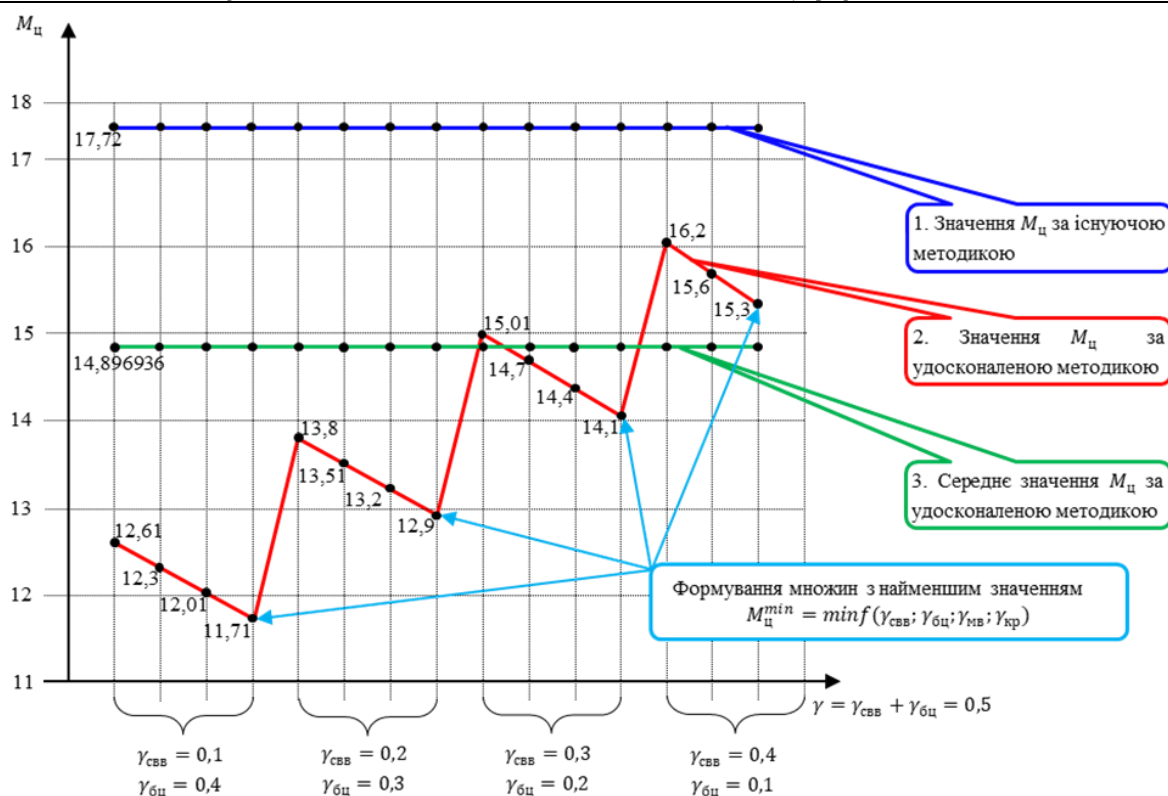


Рисунок 2 – Приклад визначення найбільш небезпечних варіантів співвідношення засобів повітряного нападу противника

засобів повітряного нападу противника $M_{ц}^{min} = \min(\gamma_{свв}; \gamma_{бц}; \gamma_{мв}; \gamma_{кр})$, до яких буде прагнути противник. Після проведення аналізу можливих варіантів співвідношень кількості засобів повітряного нападу в ударі за категоріями та враховуючи досвід застосування противником засобів повітряного нападу, можливо провести відбір найбільш імовірних варіантів.

Щоб оцінити ефективність методики та порівняти її з існуючою, обчислено середнє значення $M_{ц}$ – графік №3, за допомогою якого видно зміну значення на 3 одиниці з врахуванням додаткових факторів відносно затверджених керівними документами.

Висновки

Удосконалена методика обґрунтування складу угруповання зенітних ракетних військ дає змогу більш ґрунтовно визначати потрібний склад угруповання, враховуючи найбільш небезпечні дії противника. Методика включає кількісну та якісну оцінку впливу аеродинамічних цілей на середніх і великих висотах, цілей, що діють по балістичним траєкторіям, аеродинамічних цілей на малих і гранично малих висотах, а також крилатих ракет на малих і гранично малих висотах. Тобто, склад угруповання засобів повітряного нападу противника пропонується розглядати не у двох категоріях, згідно існуючого порядку розрахунку, а у чотирьох.

Таким чином, удосконалення підходу до оцінювання вогневих можливостей зенітних ракетних військ стало основою для удосконалення методики обґрунтування складу угруповання

зенітних ракетних військ і може стати основою для проведення первинних розрахунків під час планування бойових дій угруповання.

Напрямок подальших досліджень може стати обґрунтування рекомендацій в конкретних умовах обстановки щодо складу угруповання зенітних ракетних військ, яке найбільш адекватно буде відповідати рівню загроз з повітря, що очікуються.

Список використаних джерел

- Оцінювання ефективності бойових дій підрозділів родів військ Повітряних Сил : навч. посібн. / С.П.Ярош, А.О.Бережний, В.Г.Малюга, Д.О.Меленті. – Х. : ХНУПС, 2024. – 180 с.
- Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння : навч. посіб. / колектив авторів; за заг. ред. А. Г. Салія. – К. : НУОУ, 2025. 192 с.
- Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2017. № 2(27). С. 19-25.
- Воєнно-історичний опис російсько-української війни (лютий-березень 2022 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2022. 114 с.
- Воєнно-історичний опис російсько-української війни (червень 2022 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2022. 129 с.
- Воєнно-історичний опис російсько-української війни (лютий 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 184 с.
- Воєнно-історичний опис російсько-української війни (березень 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 179 с.

8. Военно-историчний опис російсько-української війни (червень 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 203 с.
9. Военно-историчний опис російсько-української війни (липень 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 208 с.
10. Военно-историчний опис російсько-української війни (серпень 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, М. Забродський, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 204 с.
11. Военно-историчний опис російсько-української війни (січень 2024 року): військова публікація / О. Сирський, А. Баргилевич, О. Шевченко та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2024. 205 с.
12. Генеральний штаб ЗС України. Офіційна сторінка в Facebook. URL: <https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua>
13. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року): навч. посіб. / колектив авторів ; за заг. ред. М.А. Левченка. – К. : НУОУ, 2024. 96 с.
14. Єрмошин М. О. Основні показники для оцінки ефективності функціонування системи протиповітряної оборони. Збірник наукових праць ХНУПС. Харків, 2008. № 2 (17). С. 14–16.
15. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України в російсько-українській війні : досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року): навч. посіб. / колектив авторів ; за заг. ред. М.А. Левченка. – К. : НУОУ, 2024. 103 с.
16. Ярош С. П. Обґрунтування раціонального варіанту бойового порядку зенітних ракетних підрозділів при відбитті удару крилатих ракет. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2014. № 2 (15). С. 79–85.
17. Торопчин А.Я., Романенко І.О., Даник Ю.Г. та ін. Довідник з протиповітряної оборони. – К.: МО України, Х: ХВУ, 2003. – 368 с.
18. Торопчин А. Я., Кириченко І.О., Єрмошин М.О., Дробаха Г.А., Долина М.П. Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка її ефективності: Монографія, 2006. 347 с.
19. Печененко, О., Ярошенко, Я., & Блискун, О. (2024). Загальні підходи до оцінювання ефективності протиповітряної оборони з урахуванням застосування фрв-дронів-перехоплювачів. Повітряна міць України, 2(7), 50–54. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-50-54>.
20. Закутін К.В., Воронін В.В., Шулежко В.В. Розробка сценаріїв тактичних ситуацій бойового застосування зенітних ракетних підрозділів для оцінювання ефективності бойових дій методом імітаційного моделювання. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2015. № 4 (21). С. 46–54.
21. Глоба, О. В., & Левченко, М. А. (2022). Уточнення понятійного апарату для проведення досліджень ефективності і спроможностей системи зенітного ракетного прикриття. Повітряна міць України, 1(2(3)), 17–23. [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2\(3\)-17-23](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2(3)-17-23).

Oleh Novikov

<https://orcid.org/0009-0000-3493-8214>

Oleksandr Hloba (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-1423-8365>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

RECOMMENDATIONS FOR THE WEAPONS AND MILITARY TECHNIQUES RECOVERY EFFICIENCY IMPROVING FOR ANTI-AIRCRAFT MISSILE FORCES

The article presents an improved approach for assessing the firepower capabilities of a grouping of surface-to-air missile (SAM) forces when countering different types of aerial threats. The aim of the study was to refine the methodology for substantiating the composition of a SAM force grouping by accounting for additional factors, namely the simultaneous impact of air-breathing targets at medium and high altitudes, targets following ballistic trajectories, as well as air-breathing targets and cruise missiles at low and ultra-low altitudes. Unlike the existing calculation procedure, a four-category classification is proposed, which enables a more precise justification of the SAM force grouping composition. The results allow the identification of the most dangerous variants of attacking airborne force compositions at early stages of planning, the forecasting of their effect on the grouping's effectiveness, and the formulation of practical recommendations for optimizing the composition of the SAM grouping. The proposed methodology has practical value for calculating firepower capabilities during combat planning.

Key words: grouping of surface-to-air missile forces, firepower capabilities, improved methodology, airborne attack means, air defence, air defence system.

References

1. Otsiniuvannya efektyvnosti boiovykh dii pidrozdiliv rodiv viisk Povitrianykh Syl : navch. posibn. / S.P.Iarosh, A.O.Berezhnyi, V.H.Maliuha, D.O.Melenti. – Kh. : KhNUPS, 2024. – 180 s.
2. Zasoby protypovitrianoi ta protyraketnoi oborony Syl oborony Ukrainy. Inozemne ozbroiennia : navch. posib. / kolektyv avtoriv ; za zah. red. A. H. Saliia. – K. : NUOU, 2025. 192 s.
3. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. 2017. № 2(27). S. 19-25.
4. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (liutyi-berezen 2022 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2022. 114 s.
5. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (cherven 2022 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2022. 129 s.
6. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (liutyi 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2023. 184 s.
7. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (berezen 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2023. 179 s.
8. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (cherven 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2023. 203 s.
9. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (lypen 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2023. 208 s.
10. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (serpen 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, M. Zabrodskyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2023. 204 s.
11. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (sichen 2024 roku): viiskova publikatsiia / O. Syrskyi, A. Barhylevych, O. Shevchenko ta in. Kyiv: MOU; HSH ZS Ukrainy, 2024. 205 s.
12. Heneralnyi shtab ZS Ukrainy. Ofitsiina storinka v Facebook. URL: <https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua>
13. Zastosuvannya syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (liutyi 2022 roku – lypen 2023 roku): navch. posib. / kolektyv avtoriv ; za zah. red. M. A. Levchenko, – K. : NUOU, 2024. 96 s.
14. Iermoshyn M. O. Osnovni pokaznyky dlia otsinky efektyvnosti funktsionuvannya systemy protypovitrianoi oborony. Zbirnyk naukovykh prats KhNUPS. Kharkiv, 2008. № 2 (17). S. 14–16.
15. Zastosuvannya syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy v rosiisko-ukrainskii viini : dosvid, uroky, rekomendatsii (serpen – hruden 2023 roku): navch. posib. / kolektyv avtoriv ; za zah. red. M. A. Levchenko, – K.: NUOU, 2024. 103 s.
16. Yarosh S. P. Obgruntuvannya ratsional-noho variantu boiovoho poriadku zenitnykh raketnykh pidrozdiliv pry vidbytti udaru krylatykh raket. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. 2014. № 2 (15). S. 79–85.
17. Toropchyn A.Ia., Romanenko I.O., Danyk Yu.H. ta in. Dovidnyk z protypovitrianoi oborony. – K.: MO Ukrainy, X: KhVU, 2003. – 368 s.
18. Toropchyn A. Ya., Kyrychenko I.O., Yermoshyn M.O., Drobakha H.A., Dolyna M.P. Syntez adaptyvnykh struktur systemy zenitnoho raketno-artylerskoho prykryttia obektiv i viisk ta otsinka yii efektyvnosti: Monohrafiia, 2006. 347 s.
19. Pechenko, O., Yaroshenko, Ya., & Blyskun, O. (2024). Zahalni pidkhody do otsiniuvannya efektyvnosti protypovitrianoi oborony z urakhuvanniam zastosuvannya fvp-droniv-perekhopliuvachiv. Povitriana mits Ukrainy, 2(7), 50–54. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-50-54>.
20. Zakutin K.V., Voronin V.V., Shulezhko V.V. Rozrobka stsenariiv taktichnykh sytuatsii boiovoho zastosuvannya zenitnykh raketnykh pidrozdiliv dlia otsiniuvannya efektyvnosti boiovykh dii metodom imitatsiinoho modeliuvannya. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. 2015. № 4 (21). S. 46–54.
21. Hloba, O. V., & Levchenko, M. A. (2022). Utochnennia poniatiinoho aparatu dlia provedennia doslidzhen efektyvnosti i spromozhnosti systemy zenitnoho raketnoho prykryttia. Povitriana mits Ukrainy, 1(2(3), 17–23. [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2\(3\)-17-23](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-2(3)-17-23).

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-33-40

УДК.355.424.4

¹Степанов Григорій Сергійович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-9190-2821>

¹Опенько Павло Вікторович (кандидат технічних наук, старший дослідник)

<https://orcid.org/0000-0001-7777-5101>

²Доска Олександр Михайлович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-9874-8716>

²Різніченко Ерік Андрійович

<https://orcid.org/0009-0002-5659-8411>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЗАГРОЗИ ОБ'ЄКТАМ ПРИКРИТТЯ ВІД ДІЙ ПОВІТРЯНОГО ПРОТИВНИКА

Аналіз бойових дій в російсько-українській війні свідчить, що у сучасних умовах забезпечення надійного захисту повітряного простору набуває особливої актуальності. Зростання інтенсивності бойових дій, поширення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та використання алгоритмів штучного інтелекту у веденні воєнних операцій вимагає від систем протиповітряної оборони (ППО) нових підходів до виявлення, аналізу та нейтралізації загроз. У цьому контексті критично важливим є впровадження алгоритмів, здатних оперативно оцінювати рівень загрози та раціонально розподіляти доступні вогневі ресурси з урахуванням невизначеності вхідних даних.

Одним із таких рішень є алгоритм оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття, який реалізований в сучасних зенітних ракетних комплексах (ЗРК) таких як IRIS-T SLM та NASAMS. Зазначений алгоритм продемонстрував свою ефективність в умовах бойових дій. Проте ефективність його значною мірою залежить від здатності працювати в умовах невизначеності, часової, інформаційної та ресурсної обмеженості. Метою статті є наукове обґрунтування основних положень методики оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття від дій повітряного противника, направленої на підвищення ефективності прийняття рішень цілерозподілу.

З огляду на складність бойового середовища та наявність численних невизначених чинників, у роботі розглянуто методичний підхід, в основу якого покладено використання Баєсової мережі. Такий підхід дає змогу враховувати взаємозв'язки між змінними, обчислювати ймовірності та оновлювати їх у реальному часі на основі нових даних, що дозволяє швидко приймати достовірне рішення, не потребує значних витрат машинної пам'яті та враховує як динамічний характер загроз, так і обмеження бойових ресурсів, що є особливо актуальним в умовах сучасної війни.

Ключові слова: оцінювання загроз, повітряний противник, засоби ураження, зенітний ракетний комплекс, об'єкт прикриття.

Вступ

В сучасних реаліях ведення війни, які характеризуються високою динамікою змін, зростаючою складністю управлінських процесів та обсягом доступної інформації, ефективне прийняття рішень набуває критичного значення. Традиційні методи аналізу та оцінювання ситуацій дедалі частіше поступаються місцем інтелектуальним системам, здатним обробляти великі масиви даних, виявляти закономірності та формувати обґрунтовані рекомендації.

Яскравим прикладом такої системи є "Threat evaluation and weapon allocation" (TEWA), що представляє собою комп'ютеризовану систему, яка генерує дані, необхідні при прийманні рішень, у

процесах оцінювання загрози та цілерозподілу [1, 2].

Оцінювання загрози є фундаментом для формування стратегій реагування, розподілу наявних ресурсів та вибору оптимальних варіантів цілерозподілу. Воно дозволяє командирам відповідного рівня уникнути імпульсивних або неефективних рішень у критичних ситуаціях, тим самим мінімізувати втрати від дії повітряного противника.

Тому удосконалення методичного апарату оцінювання загроз об'єктам прикриття від дій повітряного противника є важливим науковим завданням.

Матеріали та методи

Питанням оцінювання загроз та розподілу вогневих засобів присвячено багато наукових праць. Особливої уваги потребують джерела, що висвітлюють алгоритмічні підходи до ранжування загроз, використання технічних засобів моніторингу та інтеграцію даних розвідки в процес прийняття рішень. Проведений авторами аналіз дозволив виявити наявні наукові та прикладні підходи, оцінити їх ефективність і релевантність, а також окреслити напрями подальшого вдосконалення методики оцінювання загроз.

Зокрема в [1] запропонований підхід до оцінки ефективності систем TEWA, який полягає у використанні результатів моделювання сценаріїв протиповітряної оборони та показника ефективності – відношення вартості об'єктів прикриття, що залишилися після удару, до вартості всіх об'єктів прикриття.

В [2] проведено порівняльний аналіз можливостей оператора щодо оцінювання загрози в ручному та напівавтоматичному режимі з використанням TEWA у системі автоматизованого управління AN/TSQ-73. Встановлено, що ефективність застосування TEWA зростає із збільшенням складності повітряного нальоту.

В роботі [3] пропонується підхід до оцінки загроз та розподілу зброї шляхом використання "3-D SMA" моделі. Ця модель базується на параметричному автоматичному оцінюванні загрози з подальшим використанням отриманої оцінки для планування та розподілу зброї, враховуючи, що ціль з більшим індексом загрози має вищий пріоритет для перехоплення. В основі оцінювання загрози лежить часове положення цілі в просторі відносно заданої межі.

Робота [4] присвячена оцінці загрози в режимі реального часу від аеродинамічних цілей з фіксованим крилом. В [4] запропоновано три рівня математичних моделей різного ступеня складності, що працюють одночасно, причому більш складні моделі впроваджуються поступово, коли вони починають давати реалістичні результати. Моделі першого рівня є простими та дають наближений бінарний результат. Моделі другого рівня є детерміновані та використовують такі показники загрози, як час польоту до об'єкту прикриття або курсовий параметр. Моделі третього рівня є ймовірнісні та враховують дані про положення об'єкта прикриття, кінематику літака, дані про озброєння літака, а також тактику його застосування. Результатом моделювання є оцінка ймовірності того, що літак атакує або знищить об'єкт прикриття.

Разом з тим, на сьогоднішній день відсутні уніфіковані підходи, які дозволяла б комплексно оцінювати рівень загрози для об'єктів прикриття з боку повітряного противника з урахуванням типу засобів повітряного нападу, їх характеристик, параметрів наміру та параметрів захищеності об'єктів прикриття. Існуючі підходи [1-4] здебільшого ґрунтуються на часовому положенні цілі, не враховують багатовимірність загроз та не

забезпечують достатньої точності для обґрунтованого прийняття рішення з цілерозподілу.

У зв'язку з цим виникає потреба у розробці формалізованої методики оцінювання загрози, яка базуватиметься на системному аналізі технічних, тактичних та просторово-часових параметрів, що впливають на ефективність прикриття. Така методика має стати інструментом підтримки прийняття рішень, сприяти оптимізації розподілу ресурсів та підвищенню стійкості об'єктів до дії повітряного противника.

Метою статті є наукове обґрунтування основних положень методики оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття від дій повітряного противника, направленої на підвищення ефективності прийняття рішень цілерозподілу.

Результати

Постановка задачі оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття від дії повітряної противника має на меті формалізувати процес аналізу ризиків та визначити заходи для мінімізації загрози.

Проведений аналіз підходів, реалізованих в сучасних ЗРК, свідчить, що задача оцінювання загрози вирішується для кожного об'єкту прикриття окремо [5, 6]. Доцільність такого підходу обґрунтовано в [7], тому розглянемо випадок, коли і-та повітряна ціль діє по j-му об'єкту прикриття.

Вхідними даними для вирішення задачі оцінки загрози об'єкту прикриття є:

- а) дані про об'єкт прикриття:
 - географічні дані об'єкту прикриття (координати, особливості рельєфу місцевості);
 - технічні характеристики об'єкту прикриття (розміри, конструкція, рівень захисту);
- б) дані про повітряну ціль:
 - тип цілі (літак, крилата ракета, БпЛА);
 - параметри польоту цілі (швидкість, висота, напрямки);
 - дані про озброєння повітряної цілі (маса, тип, характеристики точності засобів вогневого ураження);
- в) можливості ЗРК щодо знищення повітряної цілі (параметри зони ураження, ймовірнісні характеристики по знищенню повітряних цілей).

Очікуваний результат – категорія загрози (якісна характеристика, що характеризується відсотковим значенням рівня загрози).

В якості числової характеристики рівня загрози j-му об'єкту прикриття від дії i-ї цілі, k-го типу приймемо ймовірність $P_{(i,k,j)}(Q)$ (Q) виражену у відсотковому значенні. За своїм фізичним змістом $P_{(i,k,j)}(Q)$ характеризує можливість ураження j-го об'єкту прикриття i-м засобом повітряного нападу (ЗПН), k-го типу.

Для побудови математичної моделі оцінювання рівня загрози скористаємося головним припущення теорії побудови мереж Байєса, яке полягає в тому, що події, які розглядаються є вичерпними і не перетинаються [8]. При виконанні цих умов ймовірність події Q можна обчислити за допомогою умовних ймовірностей:

$$P_{i,k,j}(Q) = P_{i,k,j}(H) \times P_{i,k,j}(Q/H) \quad (1)$$

де $P_{i,k,j}(H)$ – ймовірність того, що i -й ЗПН k -го типу подолає ППО j -го об'єкта прикриття з метою його ураження;

$P_{i,k,j}(Q/H)$ – коефіцієнт бойової готовності зенітного ракетного підрозділу j -го типу;

У випадку знищення повітряної цілі уламки, які утворюються, можуть нанести пошкодження об'єкту прикриття, тому виникає необхідність збиття повітряних цілей на деякій відстані, що гарантовано забезпечує цілісність об'єкта прикриття. Розміри такого району апроксимуються колом заданого радіусу, значення якого визначається типом засобу ураження противника.

Виконання бойового завдання авіацією противника залежить від ефективності засобів ППО. Одним з основних показників ефективності n -го ЗРК є ймовірність знищення i -го ЗПН k -го типу $R_{i,k,n}$.

У випадку якщо ціль діє в зоні відповідальності N ЗРК ймовірність її знищення може бути розрахована за співвідношенням:

$$R_{i,k,N,j} = 1 - \prod_{n=1}^{N_j} (1 - R_{i,k,n}). \quad (2)$$

де N – кількість ЗРК, призначених для прикриття j -го об'єкта прикриття.

Намір провести атаку j -го об'єкта прикриття може бути оцінено за показником курсового параметру i -го ЗПН, розраховано відносно об'єкта прикриття.

Скористаємося гіпотезою про експоненціальний розподіл випадкової величини $p_{i,k,j}$, отримуємо:

$$W(p_{i,k,j}) = \exp\left(-\frac{p_{i,k,j}}{p_{i,k,j}^*}\right) \quad (3)$$

де $p_{i,k,j}$ – значення курсового параметру i -го ЗПН k -го типу відносно j -го об'єкта прикриття;

$p_{i,k,j}^*$ – задане значення курсового параметру i -го ЗПН k -го типу відносно j -го об'єкта прикриття.

Задане значення $p_{i,k,j}^*$ встановлюється для кожного типу ЗПН з урахуванням його маневрених можливостей та граничних навантажень.

Тоді $P_{i,k,j}(H)$ може бути розраховано за співвідношенням:

$$P_{i,k,j}(H) = \prod_{n=1}^{N_j} (1 - R_{i,k,n}) \times \exp\left(-\frac{p_{i,k,j}}{p_{i,k,j}^*}\right) \quad (4)$$

де $(1 - R_{i,k,N,j})$ – ймовірність того, що i -й ЗПН k -го типу не буде уражено при подоланні системи ППО j -го об'єкта прикриття.

Співвідношення (4) враховує наміри повітряного противника нанести удар по об'єкту прикриття та можливості створеної системи протиповітряної оборони щодо вогневої протидії.

Досвід російсько-української війни свідчить, що для нанесення повітряних ударів по об'єктах прикриття, як правило, використовують боєприпаси фугасної або осколково-фугасної дії [9]. Ефективність таких боєприпасів може бути оцінена за значенням радіуса пошкодження об'єкта прикриття, R_{Π}

$$R_{\Pi} = \frac{(1 - K_{\text{осл}})B^3 \sqrt{G_{\text{вр.п}}^2}}{I_{\text{yx}}} \quad (5)$$

де I_{yx} – питомий імпульс вибухової хвилі, що впливає на об'єкт прикриття;

B – постійний коефіцієнт, який при спорядженні засобу ураження тротилом, гексогеном та іншими сумішами дорівнює 80;

$G_{\text{вр.п}}$ – приведена вага вибухової речовини;

$K_{\text{осл}}$ – коефіцієнт ослаблення дії засобів ураження за рахунок інженерного обладнання об'єкта прикриття.

При гіпотезі про те, що помилки стрільби залежать від великої кількості випадкових факторів та розподіленні за розподілом Райса [10], з однаковими середніми квадратичними відхиленнями та не нульовим математичним сподіванням (коли точка прицілювання не співпадає з координатами об'єкта прикриття), ймовірність $P_{i,k,j}(Q/H)$ розраховується за співвідношенням:

$$P_{i,k,j}\left(\frac{Q}{H}\right) = \int_0^{R_{\Pi}} \frac{2\rho^2 R}{E_{i,j}^2} \cdot \exp\left\{-\left(\rho^2 \frac{A_{i,k,j}^2 + R^2}{E_{i,j}^2}\right)\right\} I_0\left(\frac{2\rho^2 A_{i,k,j} R}{E_{i,j}^2}\right) dR \quad (6)$$

де $A_{i,k,j}$ – середня відстань від точки прицілювання i -го ЗПН k -го типу до j -го об'єкта прикриття;

I_0 – функція Бесселя першого роду нульового порядку;

$E_{i,k}$ – величина ймовірного відхилення точки попадання i -го ЗПН k -го типу від точки прицілювання;

ρ – значення аргументу, при якому функція Лапласа дорівнює половині ($\rho = 0,477$).

У випадку збігу координат точки прицілювання з координатами об'єкта прикриття ймовірність співвідношення (6) приймає вигляд:

$$P_{i,k,j}(Q/H) = 1 - \exp\left[-\rho^2 \left(\frac{R_{\text{ф.пр}}}{E_{i,k}}\right)^2\right] \quad (7)$$

Підставимо (4) та (7) в (1) отримуємо фінальне співвідношення:

$$P_{i,k,j}(Q) = \left[1 - \exp \left[-\rho^2 \left(\frac{R_{\text{ф.нр}}}{E_{i,k}} \right)^2 \right] \right] \times \left[\prod_{n=1}^{N_j} (1 - R_{i,k,n}) \times \exp \left(-\frac{p_{i,k,j}}{p_{i,j}^*} \right) \right] \quad (8)$$

Математична модель (8) враховує тип бойової частини, потужність бойової частини, ступінь захищеності об'єкта прикриття, точність наведення засобу ураження, параметри польоту засобу ураження, можливості створеної системи ППО щодо вогневої протидії та дозволяє визначити рівень загрози об'єкту прикриття.

Недоліком математичної моделі (8) є те, що в ній не враховано часове положення цілі відносно об'єкта прикриття, це в свою чергу не дозволяє достовірно оцінити загрозу від однотипних повітряних цілей, які мають однаковий курсовий параметр, але знаходяться на різних відстанях відносно об'єкта. Тому, в роботі запропоновано використовувати узагальнений показник, що враховує як параметри наміру і можливостей повітряної цілі, так і параметри близькості до об'єкта прикриття:

$$W_{i,k,j} = \langle \alpha \cdot P_{i,k,j}(Q), \quad \beta \cdot \tau_{i,k,j} \rangle \quad (9)$$

де $W_{i,k,j}$ – узагальнений векторний показник загрози j -му об'єкту прикриття від i -го ЗПН k -го типу;

$\tau_{i,k,j}$ – часове положення i -ї повітряної цілі k -го типу відносно j -го об'єкта;

α, β – вагові коефіцієнти параметру $P_{i,k,j}(Q)$ та $\tau_{i,k,j}$ відповідно.

Величина часу $\tau_{i,k,j}$ польоту i -ї повітряної цілі k -го типу від її поточного положення X_{ti} , Y_{ti} до деякого заданої межі R_j є однією з основних характеристик, що визначаються під час розв'язання задач управління вогнем та цілерозподілу. Значення $\tau_{i,k,j}$ дає змогу командному пункту оцінити положення цілі в часі щодо об'єкта прикриття, здійснювати добір цілей для закріплення в даному циклі цілерозподілу, встановити їхню важливість. Більше того, у разі використання спрощених методів цілерозподілу за величиною $\tau_{i,k,j}$ може здійснюватися оптимізація рішення [11].

Одержання виразів у загальному вигляді для розрахунку $\tau_{i,k,j}$ пов'язане з істотними труднощами, зумовленими деякою невизначеністю в характері майбутнього руху цілі з моменту часу, відповідного її поточному положенню $t_{\text{т}}$. Для усунення цих труднощів приймемо широко використовувати в алгоритмах прогнозування гіпотезу про рівномірно-прямолінійний рух цілі на інтервалі часу $t_{\text{вх}} - t_{\text{т}}$. За відомої швидкості польоту цілі $V_{i,k}$ завдання визначення $\tau_{i,k,j}$ зводиться до відшукування величини шляху, польоту i -ї повітряної цілі k -го типу з моменту постановки

прогнозу до моменту перетину заданої межі j -го об'єкта прикриття $S_{i,k,j}$.

Розглянемо послідовність розв'язання задачі визначення часу польоту i -ї повітряної цілі k -го типу до заданої межі j -го об'єкта прикриття (рис. 1).

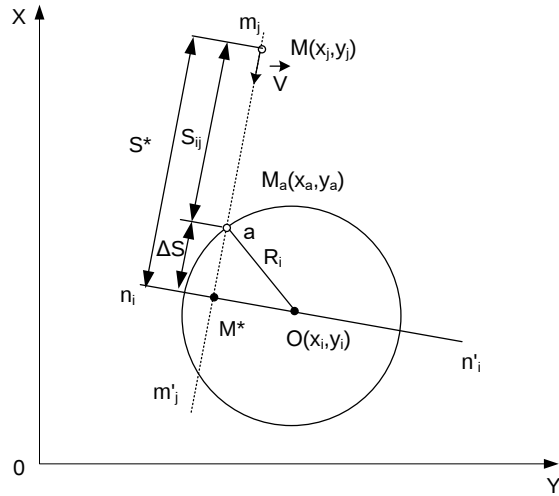


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація розв'язку задачі визначення часу польоту i -ї повітряної цілі до заданої межі j -го об'єкта прикриття

Оскільки, в сучасних ЗРК межі району встановлюється відповідно до типу повітряної цілі, індекс k з метою спрощення математичних виразів в подальшому опустимо.

Величина $S_{i,j}$ дорівнює відстані між точками $M(x_i, y_i)$ і $M(x_{aj}, y_{aj})$:

$$S_{i,j} = \sqrt{(y_{aj} - y_i)^2 + (x_{aj} - x_i)^2}, \quad (10)$$

де x_{aj}, y_{aj} – координати точки перетну заданої межі j -го об'єкта прикриття;

x_i, y_i – поточні координати i -ї повітряної цілі.

Тоді час $\tau_{i,j}$ обчислюється за формулою:

$$\tau_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_{aj} - x_i)^2 + (y_{aj} - y_i)^2}}{V_i} \quad (11)$$

Невідомі координати x_{aj}, y_{aj} точки перетину цілі заданої межі можуть бути отримані шляхом спільного розв'язання рівняння лінії курсу цілі $m_i m'_i$:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 = 0 \quad (12)$$

де A_1, B_1, C_1 – коефіцієнти загального рівняння прямої лінії, і рівняння кола радіуса R_j , що описує задану межу i -го об'єкта прикриття:

$$(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 = R_j^2 \quad (13)$$

Представлений спосіб обчислення x_{aj}, y_{aj} дещо громіздкий [11]. Зручнішим виявляється спосіб

вираження S_{ij} через координати точки перетину $M^*(x_i^*, y_i^*)$ лінії курсу цілі $m_i m_i'$ та перпендикулярної їй прямої $n_j n_j'$, що проходить через точку знаходження i -го об'єкта прикриття. У цьому разі мають місце співвідношення:

$$S_{ij} = S^* - \Delta S \quad (14)$$

$$S^* = \sqrt{(x_j^* - x_i)^2 + (y_j^* - y_i)^2} \quad (15)$$

$$\Delta S = \sqrt{R_i^2 - P_{ij}^2} \quad (16)$$

де P_{ij} – параметр j -ї цілі i -го об'єкта прикриття.

З огляду на залежності (15), (16) вираз для розрахунку $\tau_{i,j}$ набуває вигляду:

$$\tau_{i,j} = \frac{\sqrt{(x_j^* - x_i)^2 + (y_j^* - y_i)^2} - \sqrt{R_i^2 - P_{ij}^2}}{V_i} \quad (17)$$

Значення координат точки $M^*(x_i^*, y_i^*)$ знаходиться із системи рівнянь, що задають прямі $m_j m_j'$ та $n_j n_j'$ з урахуванням умови їхньої перпендикулярності. Так, якщо ці прямі подати в загальному вигляді:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 = 0 \quad (18)$$

$$A_2 x + B_2 y + C_2 = 0 \quad (19)$$

то координати точки перетину, яка лежить одночасно на кожній із прямих (18) і (19), визначаються зі співвідношень:

$$x_j^* = \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1} \quad (20)$$

$$y_j^* = \frac{C_1 A_2 - C_2 A_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1} \quad (21)$$

Значення коефіцієнтів A , B , C , у виразах (20), (21) залежать від використовуваних в алгоритмах способів задавання курсу цілі та можуть бути визначені в такий спосіб.

Лінію курсу (напрямок руху цілі) $m_i m_i'$ може бути визначено за двома точками траєкторії (x_{1i}, y_{1i}) і (x_{2i}, y_{2i}) , отриманими на деякому інтервалі спостереження, наприклад, у двох циклах роботи радіолокаційного засобу. У цьому разі рівняння прямої лінії, що проходить через дві задані точки, має вигляд:

$$\begin{aligned} (y_{2i} - y_{1i})x - (x_{2i} - x_{1i})y \\ + y_{1i}(x_{2i} - x_{1i}) - \\ - x_{1i}(y_{2i} - y_{1i}) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Коефіцієнти загального рівняння прямої лінії (22) дорівнюють:

$$A = (y_{2i} - y_{1i}) \quad (23)$$

$$B = -(x_{2i} - x_{1i}) \quad (24)$$

$$C = y_{1i}(x_{2i} - x_{1i}) - x_{1i}(y_{2i} - y_{1i}) \quad (25)$$

аналогічний вище поданому.

Отримані вирази $\tau_{i,j}$ дають змогу визначити положення цілі в часі відносно будь-якої заданої межі R_j .

Для обчислення $\tau_{i,j}$ потрібно у вираз (17) або (11) підставити значення, що відповідають межах x_j^* , y_j^* , R_j , $P_{i,j}$, або x_{aj} , y_{aj} .

Спрощена блок-схема методики оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття від дії повітряного противника представлена на рис. 2.

На першому кроці проводиться аналіз вхідних даних щодо повітряних цілей, об'єктів прикриття та можливостей щодо подолання системи протиповітряної оборони.

На другому кроці за співвідношенням (7) визначається ймовірність ураження об'єкту прикриття ЗПН, за умови того, що повітряна ціль долетить до визначеної межі (зони). При цьому враховується точність ЗПН, маса та тип бойової частини, ступінь інженерного обладнання об'єкта прикриття.

На третьому кроці за співвідношенням (2) розраховується ефективність, створеної системи ППО об'єкта прикриття.

Четвертим кроком є визначення показника наміру ЗПН (3). Для цього в роботі запропоновано використовувати показник курсу повітряної цілі відносно об'єкта прикриття.

На п'ятому кроці проводиться розрахунок ймовірності ураження об'єкту прикриття ЗПН противника (4).

Шостим кроком є розрахунок положення цілі у часі відносно об'єкта прикриття та визначення узагальненого векторного показника загрози.

При цьому ключовим етапом розв'язання багатокритеріальної векторної задачі полягає в зведенні її до однокритеріальної. Для цього можуть бути використані методи представлені в [12, 13].

На наступному кроці проводиться перевірка встановленим критеріям та присвоєння ЗПН відповідного рівня загрози.

У якості критерію прийняття рішення можуть бути використані наступні значення:

- ціль не несе загрози ($W_{i,k,j}$ менше 0,2);
- третьорядний рівень ($W_{i,k,j}$ від 0,2 до 0,5);
- другорядний рівень ($W_{i,k,j}$ від 0,5 до 0,8);
- першорядний рівень ($W_{i,k,j}$ більше 0,8).

Числові значення, наведені вище є орієнтованими та можуть обиратися відповідно технічного завдання.

Отримані результати використовуються для ранжування повітряних цілей за рівнем загрози та при вирішенні задачі цілерозподілу.

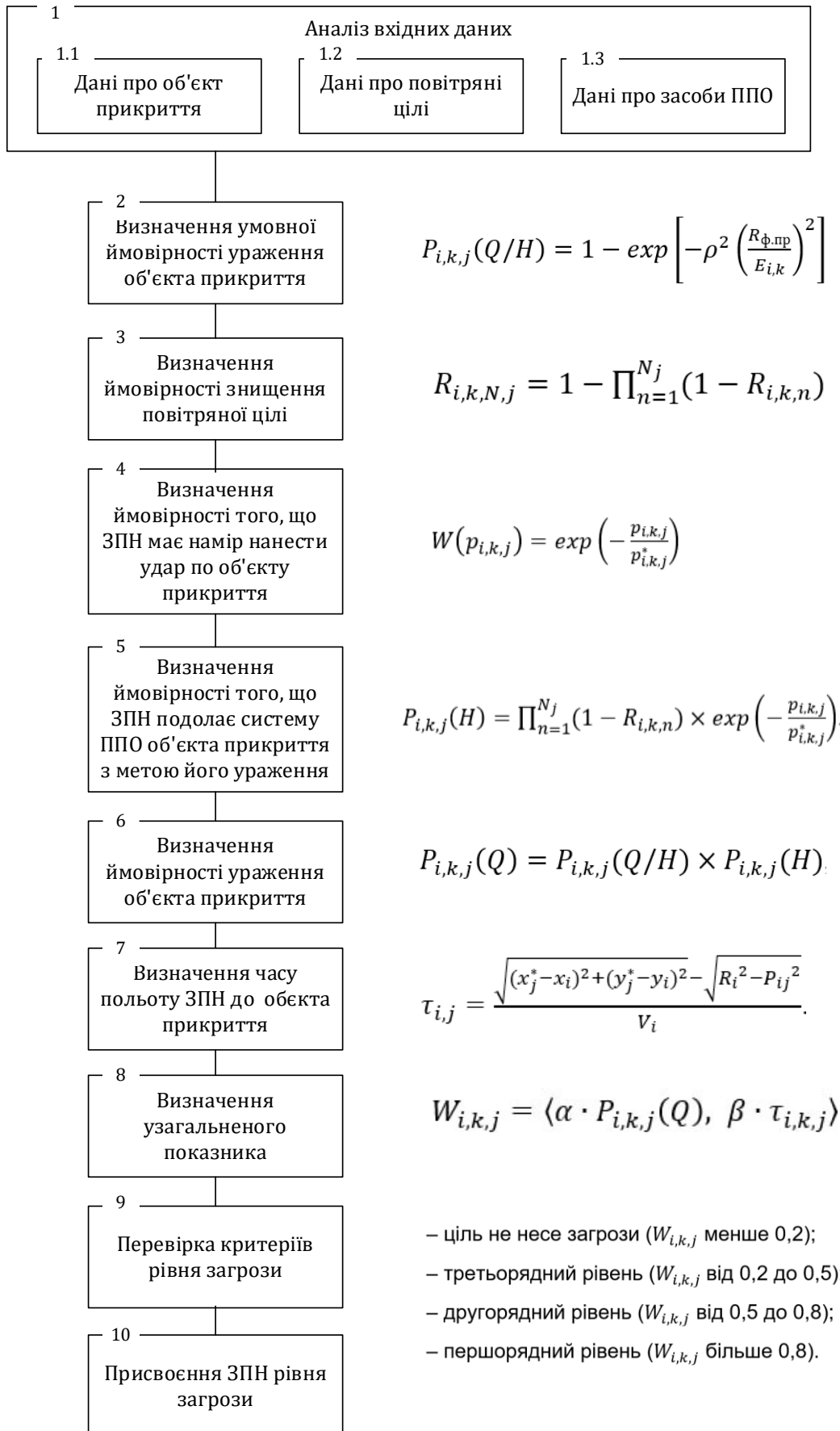


Рисунок 2 – Спрощена блок-схема методики оцінювання рівня загрози об'єктам прикриття від дії повітряного противника

Обговорення

Отже, за результатами дослідження сформульовано основні положення методики оцінювання рівня загрози об'єктів прикриття від дій повітряного противника, що базуються на системному аналізі характеристик ЗПН, параметрів їх бойового застосування та характеристиках вразливості об'єкта прикриття. Запропонована методика дозволяє здійснювати кількісну оцінку рівня загрози об'єкту прикриття в умовах невизначеності.

У якості показника оцінки рівня загрози запропоновано узагальнений показник, що враховує як параметри наміру і можливостей повітряної цілі, так і параметри наближення до об'єкту прикриття.

Розроблено математичну модель багаторфакторної оцінки загрози, яка включає ймовірнісні та часові показники, ефективності засобів ураження і захищеності об'єктів прикриття. Модель забезпечує ранжування повітряних цілей за пріоритетністю та може бути інтегрована у системи автоматизованого управління засобів ППО.

Висновки

Таким чином, практична реалізація запропонованої методики дозволить оптимізувати розподіл ресурсів та забезпечити обґрунтоване прийняття рішень щодо захисту критично важливих об'єктів та за рахунок цього підвищити ефективність функціонування систем ППО.

Подальші дослідження доцільно направити на створення алгоритмів оцінювання загрози в реальному часі у бойові інформаційно-аналітичні системи, з урахуванням обмежень обчислювальних ресурсів та вимог до оперативності.

Список використаних джерел

1. Johansson F. Performance Evaluation of TEWA Systems for Improved Decision Support / Fredrik Johansson, Goran Falkman // Lecture Notes in Computer Science, 2009. – pp 205-216. – DOI:10.1007/978-3-642-04820-3_19.
2. Jorgensen, C.C., Strub, M.H. Analysis of manual threat evaluation and weapons assignment (TEWA), in the AN/TSQ-73 air defense system. Technical Report TR 419, U.S. Army, Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 1979). – 35 p.

3. A real-time man-in-loop threat evaluation and resource assignment in defense / Afshan Naseem, Shoab Ahmed Khan, Asad Waqar Malik // Journal of the Operational Research Society, 2017, № 68. – pp. 725-738.

4. Roux J.N. Real-time threat evaluation in a ground based air defence environment. / Roux J.N., van Vuuren J. // ORiON 24(1), 2008. – pp.75-101.

5. IRIS-T SLM Medium Range Ground Based Air Defense System / Interactive Electronic Technical Publications (DokMApp Ver. 1.8.0). – Diehl Defense, 2023.

6. NASAMS Ukraine – Theory of operation / ADS-N0013-00027-00 (Issue No. 001, 13.09.2022) – Norway: Kongsberg Defense & Aerospace, 2022. – 50 p. (Electronic Technical Publications). – Raytheon Company, 2019.

7. Roux J. N. Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art / J. N. Roux, J. H. van Vuuren // ORiON. – 2007. – С. 151-187.

8. Згуровський М. З. Байсівські мережі в системах підтримки прийняття рішень / М. З. Згуровський, П. І. Бідюк, О. М. Терентьев, Т. І. Просянікіна-Жарова. – К. : ТОВ Видавниче Підприємство “Едельвейс”, 2015. – 300 с.

9. Коваль В.В. Загальний підхід щодо визначення пріоритетності повітряних загроз відповідно до прогнозованих втрат для системи оповіщення, розпізнавання та попередження населення / В. В. Коваль, О. О. Олексенко, В. А. Лупандін, І. А. Нос // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2023, № 1(50). – С. 7-14. DOI: 10.30748 / ntps.2023.50.01.

10. Бардачов Ю. М. Дискретна математика: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Ю. М. Бардачов, Н. А. Соколова, В. Є. Ходаков. – К. : Вища школа, 2002. – 287 с.

11. Честаховський В. П. Автоматизовані системи управління військ протиповітряної оборони Сухопутних військ. Частна І. Основи побудови автоматизованих систем управління / В. П. Честаховський, В. А. Джаназян, В. П. Сорокин, В. В. Азаренков. – Київ, 1977. – 396 с.

12. A. Osyzka, “An approach to multicriterion optimization problems for engineering design” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1978, т.15, № 3. – pp. 309-333.

13. Семенова Н. В. Векторні задачі дискретної оптимізації на комбінаторних множинах: методи дослідження та розв'язання: Монографія / Н. В. Семенова, Л. М. Колечкіна. – Київ: Наукова думка, 2009. – 266 с.

¹Hryhorii Stepanov (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-9190-2821>

¹Pavlo Openko (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher)

<https://orcid.org/0000-0001-7777-5101>

²Oleksandr Doska (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-9874-8716>

²Erik Riznichenko

<https://orcid.org/0009-0002-5659-8411>

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE LEVEL OF THREAT TO COVERED OBJECTS FROM AIR ENEMY ACTIONS

An analysis of combat operations in the Russian-Ukrainian war shows that ensuring reliable airspace protection is particularly important in today's environment. The increasing intensity of combat operations, the proliferation of unmanned aerial vehicles (UAVs), and the use of artificial intelligence algorithms in military operations require new approaches to the detection, analysis, and neutralization of threats by air defense systems (ADS). In this context, it is critically important to implement algorithms capable of quickly assessing the level of threat and rationally distributing available firepower resources, taking into account the uncertainty of input data.

One such solution is an algorithm for assessing the level of threat to covered objects, which is implemented in modern anti-aircraft missile systems (AAMS) such as IRIS-T SLM and NASAMS. This algorithm has proven its effectiveness in combat conditions. However, its effectiveness largely depends on its ability to operate in conditions of uncertainty and time, information, and resource constraints.

Given the complexity of the combat environment and the presence of numerous uncertain factors, the paper considers a methodological approach based on the use of a Bayesian network. This approach makes it possible to take into account the relationships between variables, calculate probabilities, and update them in real time based on new data, which allows for quick and reliable decision-making, does not require significant machine memory, and takes into account both the dynamic nature of threats and the limitations of combat resources, which is particularly relevant in the context of modern warfare.

Key words: threat assessment, airborne adversary, weapons, anti-aircraft missile system, cover object.

References

1. Johansson F. Performance Evaluation of TEWA Systems for Improved Decision Support / Fredrik Johansson, Goran Falkman // Lecture Notes in Computer Science, 2009. – pp 205-216. – DOI:10.1007/978-3-642-04820-3_19.
2. Jorgensen, C.C., Strub, M.H. Analysis of manual threat evaluation and weapons assignment (TEWA), in the AN/TSQ-73 air defense system. Technical Report TR 419, U.S. Army, Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 1979). – 35 p.
3. A real-time man-in-loop threat evaluation and resource assignment in defense / Afshan Naseem, Shoab Ahmed Khan, Asad Waqar Malik // Journal of the Operational Research Society, 2017, № 68. – pp. 725-738.
4. Roux J.N. Real-time threat evaluation in a ground based air defence environment. / Roux J.N., van Vuuren J. // ORiON 24(1), 2008. – pp.75-101.
5. IRIS-T SLM Medium Range Ground Based Air Defense System / Interactive Electronic Technical Publications (DokMApP Ver. 1.8.0). – Diehl Defense, 2023.
6. NASAMS Ukraine – Theory of operation / ADS-N0013-00027-00 (Issue No. 001, 13.09.2022) – Norway: Kongsberg Defense & Aerospace, 2022. – 50 p. (Electronic Technical Publications). – Raytheon Company, 2019.
7. Roux J. N. Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art / J. N. Roux, J. H. van Vuuren // ORiON. – 2007. – C. 151-187.
8. Zghurovskiy M. Z., Bidiuk P. I., Terentiev O. M., Prosiankina-Zharova T. I. Baiesivski merezhi v systemakh pidtrymky pryiniattia rishen. – K. : TOV Vydavnyche Pidpriemstvo “Edelweis”, 2015. – 300 s.
9. Koval V. V., Oleksenko O. O., Lupandin V. A., Nos I. A. Zahalnyi pidkhid shchodo vyznachennia priorytetnosti povitrianykh zahroz vidpovidno do prohnzovanykh vtrat dlia systemy opovishchennia, rozpoznavannia ta poperedzhennia naselennia. // Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy, 2023, № 1(50). – S. 7–14. DOI: 10.30748/nitps.2023.50.01.
10. Bardachov Yu. M., Sokolova N. A., Khodakov V. Ye. Diskretna matematyka: pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl. – K. : Vyshcha shkola, 2002. – 287 s.
11. Chestakhovskiy V. P., Dzhanazian V. A., Sorokin V. P., Azarenkov V. V. Avtomatyzovani systemy upravlinnia viisk protypovitrianoi oborony Sukhoputnykh viisk. Chastyna 1. Osnovy pobudovy avtomatyzovanykh system upravlinnia. – Kyiv, 1977. – 396 s.
12. Osyzka A. “An approach to multicriterion optimization problems for engineering design.” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1978, t. 15, № 3. – pp. 309–333.
13. Semenova N. V., Koliechkina L. M. Vektorni zadachi dyskretnoi optymizatsii na kombinatornykh mnozhynakh: metody doslidzhennia ta rozv’iazannia: Monohrafiia. – Kyiv: Naukova dumka, 2009. – 266 s.

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-41-47

УДК 623.4.027.3

¹Кошка Володимир Олегович

<https://orcid.org/0009-0007-7861-348X>

¹Гринюк Володимир Володимирович

<https://orcid.org/0009-0003-0445-4376>

²Биховець Віталій Миколайович

<https://orcid.org/0009-0002-5397-3802>

³Сальник Олег Вікторович

<https://orcid.org/0000-0002-2688-1198>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

³Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ (ЗРАЗКІВ) ОЗБРОЄННЯ І ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ

У статті розглянуто перспективні напрями розвитку автономних систем озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ Повітряних Сил Збройних Сил України. Проведено аналіз сучасного стану системи протиповітряної оборони, зокрема рівня автоматизації та бойових можливостей існуючих зразків озброєння, а також викликів, пов'язаних з необхідністю адаптації до новітніх загроз у повітряному просторі. Обґрунтовано доцільність впровадження автономних технологій на основі алгоритмів штучного інтелекту, машинного навчання та робототехніки. Запропоновано шляхи модернізації систем управління та бойового застосування, які дозволять підвищити ефективність протиповітряної оборони в умовах інтенсивних бойових дій, зменшити вплив людського фактору, забезпечити високу мобільність та стійкість до засобів радіоелектронної боротьби противника. Увагу приділено створенню єдиної мережецентричної структури протиповітряної оборони, здатної забезпечувати безперервний обмін інформацією та автономну взаємодію її елементів. Результати дослідження свідчать про стратегічну важливість впровадження автономних систем як одного з ключових напрямів підвищення обороноздатності України в ході відсічі збройної агресії російської федерації.

Ключові слова: зенітні ракетні війська, автономні системи, протиповітряна оборона, модернізація, штучний інтелект, мережецентрична війна.

Вступ

В умовах сучасних викликів, з якими стикається Україна, надзвичайно важливо забезпечити сталий розвиток і посилення спроможностей сил оборони. Зенітні ракетні війська (ЗРВ) відіграють ключову роль у забезпеченні переваги в повітрі, що є критично важливим фактором успіху в сучасній війні [1]. Досвід повномасштабної війни з російською федерацією переконливо довів, що ефективний контроль над повітряним простором є запорукою успішного захисту військ, стратегічної інфраструктури та цивільного населення [2].

Забезпечення високої бойової ефективності підрозділів ЗРВ Повітряних Сил Збройних Сил України (ПС ЗС України) вимагає впровадження інноваційних технологічних та організаційних рішень, які дозволяють синхронізувати дії різномірних підрозділів сил оборони [3]. З огляду на

зростаючу інтенсивність повітряної загрози, дедалі важливішим стає впровадження автономних систем управління та бойового застосування, що знижують вплив людського фактору та підвищують швидкість і точність прийняття рішень [4].

Зростаючі вимоги до бойового застосування підрозділів ЗРВ, а також підвищене психофізичне навантаження на персонал, обумовлюють необхідність комплексного підходу до модернізації як техніки, так і підготовки обслуг [5]. Одним із перспективних напрямів модернізації зенітних ракетних комплексів (ЗРК) є розробка та інтеграція автономних систем, здатних діяти з високим рівнем оперативної самостійності, забезпечуючи безперервність виконання завдань навіть у складних бойових умовах та в умовах порушення управління [6].

Впровадження таких систем дозволяє не лише

прискорити прийняття рішень на всіх рівнях, а й створити умови для формування мережецентричних структур управління, в яких кожен елемент системи здатен автономно оцінювати ситуацію, приймати рішення та взаємодіяти з іншими елементами без централізованого втручання [7].

Застосування алгоритмів штучного інтелекту, машинного навчання, обробки великих даних та робототехнічних рішень стає основою для створення ефективних автономних бойових платформ [8]. Проте, впровадження автономних систем супроводжується низкою проблем – зокрема, забезпеченням кібербезпеки, уніфікацією протоколів взаємодії та забезпеченням сумісності новітніх систем із існуючими зразками озброєння та військової техніки [9].

Метою статті є визначення шляхів реалізації перспективних напрямів розвитку автономних систем озброєння і військової техніки ЗРВ ПС ЗС України в умовах обмеженого або повністю відсутнього зовнішнього управління, а також у ситуаціях відсутності зовнішніх джерел забезпечення їх функціонування.

Матеріали та методи

Зенітні ракетні комплекси (ЗРК) є автономними системами озброєння, що використовуються у ЗРВ ПС ЗС України. Для ефективного розвитку автономних систем ЗРВ доцільно поєднувати максимальне використання наявних зразків ЗРК із поступовим придбанням сучасних комплексів іноземного виробництва [10].

Автономні системи ЗРВ здатні працювати в автоматичному режимі, виконуючи виявлення, супроводження повітряних цілей та прийняття рішень щодо їх знищення. Водночас бойовий досвід застосування ЗРК в автоматичному режимі свідчить про підвищений ризик ураження цивільних повітряних суден і власних літаків [11].

Основні характеристики автономних систем ЗРВ, які слід враховувати під час їх розробки:

- автоматизована обробка радіолокаційної інформації – застосування систем штучного інтелекту, алгоритмів машинного навчання та нейромереж для аналізу даних РЛС і прийняття рішень;
- автоматизоване наведення зенітних керованих ракет (ЗКР) на цілі;
- контроль технічного стану складових ЗРК та взаємодія з іншими системами озброєння при мінімальному залученні оператора;
- інтеграція систем озброєння в єдину мережецентричну систему та забезпечення оперативного обміну інформацією між різними елементами ППО;
- самостійний пошук, супроводження та ураження цілей, автоматичне виявлення, ідентифікація та знищення повітряних об'єктів без участі людини [11].

Наразі зенітні ракетні війська ПС ЗС України використовують ЗРК радянського виробництва, які не мають автономності та потребують участі оператора. Більш сучасними та технологічно досконалими є ЗРК PATRIOT (США), SAMP/T

(Італія, Франція), IRIS-T (Німеччина) та NASAMS (Норвегія, США). Деякі зразки, такі як IRIS-T, демонструють вищий рівень автономності, однак все ще потребують втручання людини.

Прототипом автономного ЗРК можна вважати ізраїльський Iron Dome, однак він має обмеження щодо продуктивності та участі людини в управлінні. У сучасних умовах ведення бойових дій збройні конфлікти характеризуються широким застосуванням високотехнологічних засобів ураження, що вимагає якісного переосмислення підходів до забезпечення бойових можливостей ЗРВ ПС ЗС України. Автономні системи (зразки) озброєння та військової техніки (ОВТ) є одним із ключових напрямів розвитку військових технологій, що дозволяють підвищити ефективність виконання бойових завдань, знизити залежність від людського фактору та забезпечити більш оперативне реагування на загрози в повітряному просторі.

Стратегічна необхідність посилення ЗРВ ПС зумовлена як досвідом відбиття збройної агресії російської федерації, так і необхідністю адаптації до стандартів НАТО. Впровадження автономних систем дозволяє вирішувати завдання розвідки, ураження повітряних та наземних цілей, забезпечення ППО, а також виконання функцій радіоелектронної боротьби без безпосередньої участі оператора або з його мінімальним контролем. В умовах ведення сучасних бойових дій такі технології дають змогу зменшити ризики втрат особового складу та забезпечити безперервність виконання бойових завдань.

Розвиток і впровадження автономних систем в ЗРВ ПС є важливим компонентом їх модернізації.

Для забезпечення надійного захисту важливих державних і військових об'єктів від ударів засобів повітряного нападу противника створюється єдина система ППО. Вона включає комплексні заходи, що охоплюють зенітне ракетно-артилерійське прикриття, винишувально-авіаційне прикриття, безпосереднє прикриття, розвідку повітряного противника, радіоелектронну боротьбу (РЕБ), систему управління та систему забезпечення.

Зенітні ракетні війська виконують завдання з відбиття авіаційних, ракетних та ударів БПЛА противника, для чого необхідна збалансована система зенітних ракетних та зенітних ракетно-артилерійських комплексів (ЗРАК) різної дальності:

- дальньої дії (ДД) – призначені для боротьби з оперативно-тактичними ракетами (ОТР), крилатими ракетами великої дальності та засобами повітряного нападу (ЗПН) оперативно-стратегічного рівня;
- середньої дальності (СД) – основні засоби боротьби з тактичними балістичними та крилатими ракетами, а також з тактичною авіацією противника;
- малої дальності (МД) забезпечують прикриття угруповань військ та об'єктів від ударів авіаційних засобів ураження та ударних БПЛА;
- ближньої дії (БД) призначені для знищення малорозмірних і малошвидкісних цілей, таких як БПЛА та гелікоптери.

Однією з ключових проблем сучасної війни є масоване використання противником засобів повітряного нападу, що поєднують високу маневреність, дальність ураження, точність та можливість групового застосування. Крім того, значну загрозу становлять малорозмірні безпілотні ударні апарати, баражуючі боєприпаси, керовані авіаційні бомби та уніфіковані планувальні боєприпаси. В умовах такої складної повітряної обстановки традиційні ЗРК, які значною мірою спираються на централізоване управління, стикаються з проблемами швидкості реагування, ефективності цілевказання та недостатності сил для масованої протидії повітряним загрозам.

Автономні зенітні ракетні комплекси (АЗРК) мають низку переваг перед традиційними системами:

- оперативне прийняття рішень. Використання алгоритмів машинного навчання дає змогу автономним ЗРК швидко класифікувати цілі та приймати рішення щодо їх ураження без затримок, пов'язаних із передачею команд централізованими пунктами управління;

- гнучкість та мобільність. Автономні ЗРК можуть швидко змінювати позиції, не потребуючи значного логістичного забезпечення, що дозволяє їм діяти в умовах ізоляваності або в зоні інтенсивних бойових дій.

- мережецентрична інтеграція. Можливість функціонування в розподілених мережах ППО, що дозволяє здійснювати обмін інформацією між автономними платформами та підвищує загальну ефективність бойового застосування.

Окрему увагу слід приділити прийняттю на озброєння роботизованих зенітних ракетних та зенітно-артилерійських комплексів ближньої дії з дальністю ураження до 5-10 км. Їхнє завдання – безпосереднє прикриття стартових позицій підрозділів ЗРВ, командних пунктів та пунктів управління. Такі комплекси можуть функціонувати як у самостійному режимі, так і в складі єдиної протиповітряної оборонної мережі.

Подальший розвиток автономних систем у ЗРВ має зосереджуватися на інтеграції алгоритмів машинного навчання для автоматизованої обробки інформації, покращенні засобів самозахисту від атак БпЛА, забезпеченні високої мобільності та підвищенні стійкості до засобів радіоелектронної боротьби противника. Використання автономних платформ дозволить зменшити навантаження на особовий склад, підвищити швидкість реагування на зміну тактичної обстановки та створити більш ефективну багаторівневу систему ППО.

Аналіз потреб ЗРВ Повітряних Сил Збройних Сил України в автономних системах озброєння та військової техніки свідчить про необхідність їх широкого впровадження для підвищення ефективності виконання бойових завдань. У ЗРВ ПС ЗС України автономні системи дозволяють зменшити залежність від людського фактору, підвищити оперативність реагування та стійкість до засобів радіоелектронного впливу противника.

Впровадження таких систем в авіації забезпечує високу автономність польотів, навігації та бойового застосування в умовах радіоелектронної боротьби,

у зенітних ракетних військах – підвищує ефективність протиповітряної оборони та гнучкість реагування на масовані удари.

Розвиток автономних систем є стратегічним напрямом, що дозволить Повітряним Силам ефективніше виконувати завдання в умовах сучасних бойових дій. Враховуючи зростаючі загрози та інтенсивність повітряної війни, автономізація бойових платформ та систем управління стає ключовим елементом майбутнього розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України.

Результати

Розвиток автономних систем ОВТ у ЗРВ ПС ЗС України є одним із ключових напрямів підвищення їхньої бойової ефективності та стійкості до сучасних загроз. З огляду на інтенсивність бойових дій та еволюцію засобів повітряного нападу, перспективні рішення мають забезпечувати не лише автономність функціонування бойових платформ, але й їхню інтеграцію в єдині інформаційно-управлінські мережі.

Подальший розвиток автономних технологій буде базуватися на впровадженні машинного навчання, удосконаленні алгоритмів обробки даних та покращенні адаптивності бойових систем до динамічної обстановки. Важливими аспектами стануть розширення можливостей автономної навігації, автоматизація бойового застосування, підвищення живучості систем у складних умовах радіоелектронної боротьби та забезпечення стійкого зв'язку між бойовими одиницями.

Сучасний розвиток зенітних ракетних військ відбувається в умовах технологічного протистояння між постійним удосконаленням засобів повітряного нападу та динамічною зміною системи протиповітряної оборони. Впровадження нових видів авіаційної та ракетної зброї змушує адаптувати зенітні ракетні комплекси для зниження ефективності новітніх загроз. Основні виклики у цій сфері обумовлені такими тенденціями:

- розширенням сфер дії засобів повітряного нападу завдяки вдосконаленню технологій літако- і ракетобудування, засобів розвідки, управління та зв'язку;

- збільшенням різноманіття загроз, включаючи пілотовані та безпілотні літальні апарати, а також гіперзвукові ракети та ударні БпЛА з малим рівнем помітності;

- підвищенням масованості атак, що включають одночасне використання хибних цілей, засобів радіоелектронної боротьби та високоточних боєприпасів;

- зростанням кількості безпілотних літальних апаратів різного призначення, що створює нові виклики для ППО.

Практично всі нові ударні засоби, які застосовуватимуться проти систем ППО, будуть високоточними, що значно підвищує вимоги до ефективності зенітних ракетних комплексів. Вони повинні бути здатні перехоплювати гіперзвукові, оперативно-тактичні та тактичні балістичні ракети, крилаті ракети, а також знищувати різні типи БпЛА.

Основними перспективними напрямками

розвитку автономних систем у зенітних ракетних військах визначено:

- підвищення ступеня автоматизації управління за рахунок вдосконалення процесів збору та обробки інформації про повітряну обстановку;
- використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання для швидкого аналізу загроз, ухвалення рішень і оптимізації процесів наведення ракет;
- розширення вогневого потенціалу шляхом збільшення канальності ЗРК, уніфікації ракет малої, середньої та великої дальності та застосування вертикального старту для скорочення часу реакції;
- впровадження розподілених сенсорних мереж для покращення виявлення повітряних загроз, зокрема засобів РЕБ противника, що створюють активні перешкоди;
- створення автономних бойових модулів ППО, здатних діяти без участі операторів та здійснювати автоматичне виявлення, супроводження і знищення цілей.

Ключовим напрямом розвитку є вдосконалення радіолокаційних систем, що забезпечують виявлення, супроводження цілей та наведення ракет. Використання пасивних, активних і цифрових фазованих антенних решіток із твердотільними випромінюючими елементами дозволить підвищити дальність і точність виявлення, особливо в умовах активної протидії засобів РЕБ противника.

Важливим завданням є підвищення стійкості ЗРК до дій противника за рахунок інтеграції активних і пасивних засобів радіолокації. Комплексування засобів активної радіолокації з пасивними каналами прийому, розвідки та захисту від високоточної зброї дозволить суттєво підвищити живучість і ефективність ППО.

Для забезпечення автономності систем важливими є такі технологічні рішення:

- впровадження багатопозиційних радіолокаційних систем, що дозволять створювати ширші зони контролю повітряного простору;
- розвиток оптико-електронних засобів виявлення для ефективної ідентифікації малорозмірних БпЛА навіть у складних умовах;
- створення нових алгоритмів управління бойовими системами для підвищення швидкості реагування на повітряні загрози.

Використання комбінованих систем наведення ракет, що включають інерційну навігацію на основній частині траєкторії та активне радіолокаційне або інфрачервоне самонаведення на кінцевому етапі, дозволить розширити можливості знищення цілей та звільнити стрільбову РЛС від необхідності супроводження кожної ракети.

Майбутні автономні ЗРК (ЗРС) можуть бути визначені як системи, що використовують штучний інтелект, алгоритми машинного навчання та автоматичні алгоритми ухвалення рішень. Вони будуть здатні виконувати завдання ППО з мінімальним втручанням людини, адаптуватися до змін обстановки та аналізувати нові загрози в реальному часі. Це створить інтегровану багаторівневу систему протиповітряної оборони,

здатну ефективно діяти в умовах масованих атак та радіоелектронної боротьби противника.

Розвиток автономних систем озброєння і військової техніки у ЗРВ ПС ЗС України є критично важливим напрямом у контексті сучасних бойових дій, що характеризуються високою інтенсивністю, застосуванням засобів РЕБ та необхідністю швидкого ухвалення рішень в умовах обмеженого зв'язку з центрами управління. В умовах війни, коли противник активно придушує комунікаційні канали, перехоплює сигнали управління та використовує засоби високоточної зброї, необхідність підвищення рівня автономності бойових систем стає визначальною для їх ефективного застосування.

Головним викликом є забезпечення автономного функціонування бойових платформ у ситуаціях, коли вони не можуть отримувати оперативні команди ззовні або позбавлені доступу до зовнішніх джерел забезпечення, таких як навігаційні супутники, системи зв'язку чи централізоване постачання ресурсів. Це вимагає впровадження передових алгоритмів штучного інтелекту для самостійного аналізу бойової обстановки, розробки автономних систем навігації та управління, а також створення технологій самозабезпечення ресурсами, включаючи енергоефективні рішення та розширену логістичну автономність.

Розвиток автономних систем ЗРВ є необхідною умовою адаптації до нових викликів у сфері протиповітряної оборони. Використання традиційних методів управління ППО стає все менш ефективним через технологічний розвиток ЗПН, активне застосування противником засобів РЕБ, кібернетичних атак та високоточних засобів ураження. У цих умовах перспективним напрямом є розробка автономних ЗРК, здатних діяти без централізованого управління та зовнішнього забезпечення.

Основні напрями автономізації ЗРВ:

- розробка архітектури автономної бойової системи – передбачає визначення рівня автономності, розподіл функцій між оператором та машинними алгоритмами при бойовому застосуванні, навчанні та технічному обслуговуванні;
- вибір платформи для інтеграції засобів ЗРВ – доцільним є використання вже існуючих автоматизованих систем управління, що значно прискорить розробку та впровадження автономних комплексів;
- інтеграція ШІ – впровадження алгоритмів машинного навчання для автоматизованого виявлення, супроводження та знищення цілей з можливістю коригування оператором у критичних ситуаціях;
- тестування та експлуатація – випробування автономних бойових систем із функцією блокування хибних рішень оператором, оцінка ефективності та внесення коригувань.

Автономність ЗРК також повинна враховувати можливі умови ведення бойових дій без зовнішніх джерел забезпечення (відсутність зв'язку, обмежене постачання боєприпасів, відсутність

зовнішньої розвідувальної інформації). Це вимагає розробки модульних бойових одиниць, що можуть діяти незалежно та адаптуватися до мінливих бойових умов.

Автономний бойовий модуль ЗРК. Одним із перспективних рішень є створення модульних автономних ЗРК, які поєднують у собі:

- радіолокаційні та оптичні засоби виявлення;
- автономні системи енергозабезпечення;
- керовані зенітні ракети;
- систему управління вогнем на основі ШІ.

Такі модулі можуть бути розміщені на різних платформах:

- мобільних (колісних або гусеничних шасі);
- стаціонарних (об'єкти інфраструктури, дахові майданчики у містах);
- морських (палуби кораблів, плавучі платформи);
- повітряних (дирижаблі, БпЛА);
- низько орбітальні супутники.

Гнучкість у розміщенні автономних бойових модулів дозволить значно розширити зону покриття ППО, забезпечити мобільність і оперативне розгортання ЗРК в складних умовах.

Обговорення

Зростаюча інтенсивність бойових дій та технологічний прогрес вимагають переходу від централізованих систем протиповітряної оборони до гнучких, самодостатніх бойових комплексів, здатних діяти незалежно від зовнішнього управління. Основними технологічними рішеннями для цього є:

- подальший розвиток штучного інтелекту для автономного керування та ухвалення рішень;
- впровадження енергонезалежних систем живлення, що забезпечать тривале функціонування без зовнішнього підключення;
- створення адаптивних алгоритмів бойового застосування, що дозволять автономним ЗРК реагувати на зміну бойової обстановки в реальному часі.

Автономні ЗРК стануть ключовим елементом майбутньої протиповітряної оборони, дозволяючи адаптуватися до сучасних викликів ведення бойових дій. Впровадження цих рішень забезпечить підвищену живучість ППО, оперативне розгортання захисних систем та ефективне знищення повітряних загроз без залежності від централізованого управління.

Висновки

Отже одним із можливих перспективних шляхів розвитку автономних систем озброєння і військової техніки ЗРВ ПС ЗС України в умовах обмеженого або повністю відсутнього зовнішнього управління, а також у ситуаціях відсутності зовнішніх джерел забезпечення їх функціонування є створення автономних бойових модулів ЗРК.

Такі модулі можуть бути розміщені на різного роду платформах, що дозволить значно розширити можливості з прикриття в системі ППО, забезпечити мобільність і оперативне розгортання ЗРК в складних умовах.

З метою виконання даних заходів необхідно робити акцент на розробку (модернізацію) АЗРК

інтегрованих в єдину систему ППО, що дозволить більш ефективно боротися з сучасними повітряними загрозами, такими як БпЛА різних типів, гіперзвукові ракети та масовані атаки.

Необхідно впроваджувати та розвивати технологічні напрями такі як:

- розвиток алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту та автоматизації для аналізу загроз і прийняття вірних та швидких рішень;
- інтеграція систем у єдину мережецентричну мережу для швидкого обміну даними і координації під час бойової роботи.

Це призведе до збільшення переваги в АЗРК, що призведе до зниження залежності від людського фактору. Дасть можливість автономного функціонування в умовах відсутності зовнішнього управління чи забезпечення. Збільшить мобільність, швидкість реагування та стійкості до засобів радіоелектронної боротьби.

Але для цього необхідно вирішити такі проблемні питання, як необхідність сумісності нових АЗРК із існуючими системами ЗРК. Провести комплекс заходів щодо забезпечення кібербезпеки АЗРК та адаптація до сучасних загроз. Розробити та виконати уніфікацію протоколів взаємодії АЗРК та створення автономних модулів із високою гнучкістю.

Необхідно на державному рівні визначити порядок розвитку АЗРК, як ключовий напрямок до 2035 року.

Залучати інвестиції в нові технології, міжнародне співробітництво та інтеграція західних рішень (Patriot, IRIS-T, NASAMS) є критично важливими.

Автономізація ЗРК є важливим елементом модернізації оборони України. Розвиваючи даний напрямок це призведе до підвищення ефективності системи ППО в умовах інтенсивних бойових дій та складної тактичної обстановки, що вплине на збільшення виробничого та економічного потенціалу країни.

Список використаних джерел

1. Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations, AJP-3.3, NATO, 2016. Дата звернення: 10 жовт. 2025. [Онлайн]. Доступно: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a82d7bc40f0b62305b94a32/doctrine_nato_air_space_ops_ajp_3_3.pdf.
2. Генеральний штаб ЗС України. Аналіз бойових дій в умовах повітряної агресії РФ / ГШ ЗС України, 2023. – 45 с.
3. Open'ko P., V. Kobzev, V. Vasiliev, O. Uhrynovych and V. Diachenko, "Methodical approach to determining a rational option for modernization of anti-aircraft missile weapons' functional systems", JSPSDS, vol. 11, no. 6, pp. 127-139, Dec. 2021.
4. D. Vergun. "DARPA aims to develop AI, autonomy applications warfighters can trust". U.S. Department of War. [Онлайн]. Доступно: <https://www.war.gov/News/News-Stories/Article/Article/3722849/darpa-aims-to-develop-ai-autonomy-applications-warfighters-can-trust/>. Дата звернення: 10 жовт. 2025.
5. M. D. Stephenson, B. Schram, E. F. D. Canetti and R. Orr, "Effects of Acute Stress on Psychophysiology in Armed Tactical Occupations: A Narrative Review," Int. J. Environ. Res. Public Health, vol. 19, no. 3, Art. no. 1802, Feb. 2022. DOI: 10.3390/ijerph19031802.
6. R. C. Anugrah, "A Defense for Guardian Robots: Are Defensive Autonomous Weapons Systems Justifiable?",

- Harvard Int. Law J., Feb. 2024. [Online]. Available: <https://journals.law.harvard.edu/ilj/2024/02/a-defense-for-guardian-robots-are-defensive-autonomous-weapons-systems-justifiable/>. Дата звернення: 20 трав. 2025 р.
7. D. S. Alberts, J. J. Garstka and F. P. Stein, *Network Centric Warfare*. Washington, D.C.: Command and Control Research Program (CCRP), 1999, 85 pp.
8. Міністерство оборони України. Концепція розвитку ЗРВ до 2030 року / Міністерство оборони України, 2022. – 30 с.
9. L. Saalman, L. Saveleva-Dovgal and F. Su, “Mapping Cyber-related Missile and Satellite Incidents and Escalation Risks”, Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), Report, Nov. 2023. [Online]. Available: https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-11/2023_10_cyber_mapping_incidents.pdf. Дата звернення: 20 трав. 2025 р.
10. Візія Повітряних Сил 2035. Вінниця : КПС ЗС України, 2020. 39 с.
11. R. G. Melykov, “The Use of Autonomous Weapons Systems during the Russian-Ukrainian War: New Challenges to International Humanitarian Law”, *Juridical Scientific and Electronic Journal*, no. 1, pp. 619–622, 2023. DOI:10.32782/2524-0374/2023-1/145.
12. П. В. Опенько, В. В. Кобзєв, В. А. Васильєв та М. Ю. Миронюк, “Порядок визначення раціонального варіанта створення елементу функціональної системи зенітного ракетного озброєння на сучасній елементній базі”, *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ*, т. 74, № 1, с. 110–117, 2022.
13. M. Ozhevan, “Автоматизовані робототехнічні системи озброєнь: новий виклик воєнній безпеці України”, *National Institute for Strategic Studies, Kyiv, Report*, Feb. 2017, 22 pp. [Online]. Available: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2017-02/Ozhevan-86924.pdf>. Дата звернення: 20 трав. 2025 р.
14. Кабінет Міністрів України, Про схвалення Основних напрямів розвитку озброєння та військової техніки на довгостроковий період: розпорядження від 14 черв. 2017 р. № 398-р (станом на 21 лип. 2021 р.). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/398-2017-r#Text>. Дата звернення: 20 трав. 2025 р.
15. В. С. Хаустова, О. І. Решетняк, М. М. Хаустов та В. А. Зінченко, “Напрямки розвитку технологій штучного інтелекту в забезпеченні обороноздатності країни”, *Бізнес Інформ*, № 3, с. 17–26, 2022.
16. М. О. Кизим, В. С. Хаустова, В. В. Шпілевський та О. В. Шпілевський О. В., “Військово-тактичні та економічні передумови розвитку оборонної промисловості України”, *Проблеми економіки*, т. 53, № 3, с. 35–44, 2022.
17. В. Лук’янчук, І. Миколаєв, П. Опенько, І. Дзевєрін та О. Угринович, “Методика визначення пріоритетності проєктів науково-дослідних робіт у сфері розробок озброєння та військової техніки”, *Journal of Scientific Papers “Social Development & Security”*, т. 10, № 6, с. 40–56, 2020. DOI: 10.33445/sds.2020.10.6.5
18. Інтелектуальні системи автоматизації : монографія / Аврунін О. Г., Владов С. І., Петченко М. В., Семенець В. В., Татарінов В. В., Тельнова Г. В., Філатов В. О., Шмельов Ю. М., Шушляпіна Н. О. – Кременчук : Видавництво “НОВАБУК”, 2021. – 322 с.
19. В. М. Чернега, Т. П. Пашенко та І. М. Порохня, “Застосування технологій штучного інтелекту у пілотованій та безпілотній авіації”, *Повітряна міць України*, т. 1, № 1, с. 101–102, 2021.
20. В. Залужний, Р. Гришук, О. Соломицький та І. Грачов, “Перспективи розвитку безпілотних систем Збройних Сил України”, *МНЖ Military Science*, т. 2, № 1, с. 5–16, 2024.

¹Volodymyr Koshka
<https://orcid.org/0009-0007-7861-348X>

¹Volodymyr Gryniuk
<https://orcid.org/0009-0003-0445-4376>

²Vitalii Bykhovets
<https://orcid.org/0009-0002-5397-3802>

³Oleh Salnyk
<https://orcid.org/0000-0002-2688-1198>

¹National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine

³Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE IMPLEMENTATION PATHS FOR PROMISING DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS WEAPON SYSTEMS AND MILITARY EQUIPMENT OF THE AIR DEFENSE MISSILE FORCES OF THE AIR FORCES OF UKRAINE

The experience of the armed aggression of the Russian Federation against Ukraine has clearly demonstrated the strategic importance of air superiority and the ability to effectively counter air threats. Given the growing intensity and complexity of threats from high-precision weapons, unmanned aerial vehicles, and other modern air attack systems, the development and implementation of autonomous air defense missile systems is one of the key directions in enhancing the capabilities of the Air Defense Missile Forces of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine. This paper analyzes current trends in the development of autonomous air defense systems, the experience of their use in modern armed conflicts, and the prospects for their integration into Ukraine's defense system. The article outlines the main requirements for autonomous weapon systems, the technological challenges of implementation, and possible ways of modernizing existing systems, taking into account the limited possibilities of external control and ensuring operational autonomy. Particular attention is paid to the need for compatibility,

cyber security, and integration into a unified air defense network. The implementation of these technologies will increase the efficiency of combat missions, reduce dependence on human operators, and ensure high responsiveness to changing tactical conditions. The development of autonomous systems is considered a strategic step towards strengthening Ukraine's air defense and achieving interoperability with NATO standards.

Keywords: anti-aircraft missile troops, autonomous systems, air defense, modernization, artificial intelligence, network-centric warfare.

References

1. Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations, AJP-3.3, NATO, 2016. [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a82d7bc40f0b62305b94a32/doctrine_nato_air_space_ops_ajp_3_3.pdf. Accessed: Oct. 10, 2025.
2. General Staff of the Armed Forces of Ukraine. Analiz boyovykh diy v umovakh povitryanoi ahresiyi RF / GSAFU, 2023. – 45 p.
3. Open'ko P., V. Kobzev, V. Vasiliev, O. Uhrynovych and V. Diachenko, "Methodical approach to determining a rational option for modernization of anti-aircraft missile weapons' functional systems", JSPSDS, vol. 11, no. 6, pp. 127-139, Dec. 2021.
4. D. Vergun. "DARPA aims to develop AI, autonomy applications warfighters can trust". U.S. Department of War. [Online]. Available: <https://www.war.gov/News/News-Stories/Article/Article/3722849/darpa-aims-to-develop-ai-autonomy-applications-warfighters-can-trust/>. Accessed: Oct. 10, 2025.
5. M. D. Stephenson, B. Schram, E. F. D. Canetti and R. Orr, "Effects of Acute Stress on Psychophysiology in Armed Tactical Occupations: A Narrative Review," Int. J. Environ. Res. Public Health, vol. 19, no. 3, Art. no. 1802, Feb. 2022. DOI: 10.3390/ijerph19031802.
6. R. C. Anugrah, "A Defense for Guardian Robots: Are Defensive Autonomous Weapons Systems Justifiable?", Harvard Int. Law J., Feb. 2024. [Online]. Available: <https://journals.law.harvard.edu/ilj/2024/02/a-defense-for-guardian-robots-are-defensive-autonomous-weapons-systems-justifiable/>. Accessed: Oct. 10, 2025.
7. D. S. Alberts, J. J. Garstka and F. P. Stein, Network Centric Warfare. Washington, D.C.: Command and Control Research Program (CCRP), 1999, 85 pp.
8. Ministry of Defence of Ukraine. Concept for the Development of Air Defense Forces until 2030 / Ministry of Defence of Ukraine, 2022. – 30 p.
9. L. Saalman, L. Saveleva-Dovgal, and F. Su, "Mapping Cyber-related Missile and Satellite Incidents and Escalation Risks", Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), Report, Nov. 2023. [Online]. Available: https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-11/2023_10_cyber_mapping_incidents.pdf. Accessed: Oct. 10, 2025.
10. Armed Forces of Ukraine, Vision of the Air Force of Ukraine 2035, Kyiv, 2022. [Online]. Available: <https://missilethreat.csis.org/wp-content/uploads/2022/12/Air-Force-of-Ukraine-2035-eng.pdf>. Accessed: Oct. 10, 2025.
11. R. G. Melykov, "The Use of Autonomous Weapons Systems during the Russian-Ukrainian War: New Challenges to International Humanitarian Law", Juridical Scientific and Electronic Journal, no. 1, pp. 619–622, 2023. DOI:10.32782/2524-0374/2023-1/145.
12. P. V. Openko, V. V. Kobziev, V. A. Vasyliiev and M. Yu. Myroniuk, "Poriadok vyznachennia ratsionalnogo varianta stvorennia elementu funktsionalnoi systemy zenitnogo raketnoho ozbroiennia na suchasni elementni bazi", Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen NUOU, vol. 74, № 1, p. 110-117, 2022.
13. M. Ozhevan, "Avtomatyzovani robototekhnichni systemy ozbroien: novyi vyklyk voiennoi bezpetsi Ukrainy", National Institute for Strategic Studies, Kyiv, Report, Feb. 2017, 22 pp. [Online]. Available: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2017-02/Ozhevan-86924.pdf>. Accessed: Oct. 10, 2025.
14. Kabinet Ministriv Ukrainy, Pro skhvalennia Osnovnykh napriamiv rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky na dovhostrokovy period: rozporiadzhennia vid 14 cherv. 2017 r. № 398-r (stanom na 21 lyp. 2021 r.). [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/398-2017-p#Text>. Accessed: Oct. 10, 2025.
15. V. Ye. Khaustova, O. I. Reshetniak, M. M. Khaustov and V. A. Zinchenko, "Napriamky rozvytku tekhnolohii shuchnoho intelektu v zabezpechenni oboronozdatnosti krainy", Biznes Inform, № 3, p. 17–26, 2022.
16. M. O. Kyzym, V. Ye. Khaustova, V. V. Shpilievskiy and O. V. Shpilievskiy O. V., "Viiskovo-taktychni ta ekonomichni peredumovy rozvytku oboronnoi promyslovosti Ukrainy", Problemy ekonomiky, vol. 53, № 3, p. 35–44, 2022.
17. V. Lukianchuk, I. Mykolaiev, P. Openko, I. Dzeverin and O. Uhrynovych, "Metodyka vyznachennia priorytetnosti proiektiv naukovykh-doslidnykh robot u sferi rozrobok ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky", Journal of Scientific Papers "Social Development & Security", vol. 10, № 6, p. 40–56, 2020. DOI: 10.33445/sds.2020.10.6.5
18. Intelektualni systemy avtomatyzatsii : monohrafiia / Avrunin O. H., Vladov S. I., Petchenko M. V., Semenets V. V., Tatarinov V. V., Telnova H. V., Filatov V. O., Shmelov Yu. M., Shushliapina N. O. – Kremenchuk : Vydavnytstvo "NOVABUK", 2021. – 322 p.
19. V. M. Cherneha, T. P. Pashchenko and I. M. Porokhnia, "Zastosuvannia tekhnolohii shuchnoho intelektu u pilotovanii ta bezpilotnii aviatcii", Air Power of Ukraine, vol. 1, № 1, p. 101–102, 2021.
20. V. Zaluzhnyi, R. Hryshchuk, O. Solomytskyi and I. Hrachov, "Perspektyvy rozvytku bezpilotnykh system Zbroinykh Syl Ukrainy", Military Science, vol. 2, № 1, p. 5-16, 2024.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛотованої та безпілотної авіації

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-48-56

УДК [004.8/004.942+519.863]::[623.746-519::531.133.1]

¹Шовкошитний Ігор Іванович (доктор технічних наук, старший дослідник)

<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

²Василенко Ольга Анатоліївна

<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЮ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ УРАЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГРУПОВИХ ЦІЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розроблено математичну модель застосування рою ударних безпілотнох літальних апаратів для ураження нестаціонарних групових цілей противника із використанням елементів штучного інтелекту, яка, відповідно до представленої діаграми Ганта, дозволяє математично формалізувати найбільш суттєві етапи застосування рою ударних безпілотнох літальних апаратів (виявлення та розпізнавання (ідентифікація) цілей заданих класів; вибір алгоритму управління цілерозподілом рою ударних безпілотнох літальних апаратів; атака ідентифікованих цілей; оцінка (контроль) результатів ураження цілей). Математична модель поєднує: нейронні мережі кластеризації та класифікації ударних безпілотнох літальних апаратів і об'єктів групових цілей, на основі яких отримується матриця ефективності ураження об'єктів групових цілей певним класом ударних безпілотнох літальних апаратів; математичну модель динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних безпілотнох літальних апаратів по об'єктах нестаціонарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності, яка включає дві взаємопов'язані математичні моделі – на основі оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі.

Показано, що поєднання алгоритмічних та нейромережових підходів дозволяє розв'язувати задачу цілерозподілу рою ударних безпілотнох літальних апаратів по різнорідних об'єктах нестаціонарної групової цілі у реальному масштабі часу з урахуванням зміни складу групової цілі та рою ударних безпілотнох літальних апаратів. При цьому математична модель цілерозподілу рою ударних безпілотнох літальних апаратів для ураження нестаціонарних групових цілей на основі оптимізаційних задач дозволяє отримати набори даних для навчання нейронної мережі цілерозподілу, яка використовується у разі: значної розмірності задачі, коли оптимізаційна задача не дає можливості оперативно отримувати результати цілерозподілу; неповноти вхідних даних про об'єкти групових цілей противника в умовах невизначеності.

Крім того, розроблена математична модель ураховує: основні сценарії несиметричного конфлікту “неоднорідний рій безпілотнох літальних апаратів – різнорідні об'єкти групової цілі противника” та пріоритетність варіантів призначень; пріоритети ураження об'єктів групових цілей, їх прикриття засобами протиповітряної оборони, імовірності їх ураження та досяжність для ударних безпілотнох літальних апаратів рою.

Ключові слова: математична модель, бойове застосування рою ударних безпілотнох літальних апаратів, нейронна мережа, ефективність ураження, нестаціонарна груповою цілю, динамічний цілерозподіл, оптимізація, кластеризація, класифікація, штучний інтелект, ресурс рою, пріоритети ураження, варіанти призначення.

Вступ

Розвиток та застосування безпілотнох систем свідчить про суттєве зростання ролі ударних безпілотнох літальних апаратів (БпЛА) у сучасних збройних конфліктах, зокрема у російсько-українській війні [1–5]. Застосування роїв ударних БпЛА дозволяє здійснювати масовані, синхронізовані та високоточні удари по нестаціонарних групових цілях (ГЦ) противника як

на передньому краї, так і у глибині його бойових порядків. Однак ефективне управління застосуванням роєм БпЛА вимагає розв'язання низки складних задач, пов'язаних зі швидкою зміною обстановки, зміною складу рою та складу групової цілі, впливом засобів радіоелектронного та вогневого впливу противника.

Одним із ключових етапів, який впливає на ефективне застосування рою ударних БпЛА, є

цілерозподіл ударних БпЛА по об'єктах нестационарних групових цілей, склад та пріоритети ураження яких змінюються у реальному масштабі часу. Традиційні підходи до здійснення цілерозподілу, що базуються на статичних оптимізаційних моделях, не забезпечують розв'язання задачі цілерозподілу в умовах застосування неоднорідної групи (рою) БпЛА, що є необхідною умовою оптимального використання ресурсу групи (рою) БпЛА. У цьому разі доречним є використання інтелектуальних методів управління застосуванням рою ударних БпЛА на основі нейронних мереж (НМ), які здатні адаптивно здійснювати динамічний цілерозподіл рою ударних БпЛА в умовах швидкоплинної обстановки.

Аналіз наукових публікацій та досліджень [6–12] свідчить про наявність доволі розвинутого методичного апарату, який може бути застосований для опису процесів функціонування безпілотної систем, проте дослідженню питань математичного моделювання застосування рою ударних БпЛА приділялось менше уваги. При цьому наявні праці мають або занадто вузьку спрямованість, або в узагальненому вигляді описують процеси взаємодії БпЛА у групі (рою). Здебільшого це прості математичні (розрахункові) моделі, що описують окремі процеси застосування рою ударних БпЛА, а саме: узгоджений рух групи БпЛА, їх самоорганізацію, управління, розпізнавання цілей та цілерозподіл. Проте питання розподілу неоднорідного ресурсу рою ударних БпЛА для ураження нестационарних ГЦ в умовах реального часу потребують математичної формалізації з використанням технологій штучного інтелекту, який нині активно впроваджується у військовій галузі [13].

Це зумовлює необхідність розроблення математичного апарату застосування рою ударних БпЛА, який би поєднував відомі оптимізаційні підходи та елементи штучного інтелекту під час розв'язання задач класифікації БпЛА і об'єктів ГЦ, цілерозподілу з урахуванням пріоритетності їх ураження та забезпечував адаптивність управління таким цілерозподілом.

Зважаючи на зазначене, **метою статті** є розроблення математичної моделі застосування рою ударних БпЛА із використанням елементів штучного інтелекту.

Матеріали та методи

Дослідження обраної у статті тематики базується на використанні окремих положень системного підходу до розв'язання складних завдань, методів оптимізації (зокрема лінійного цілочисельного програмування), відомих з теорії дослідження операцій та методів штучного інтелекту.

Результати

В основу математичної моделі застосування рою ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей противника із використанням елементів штучного інтелекту покладено результати досліджень проблемних питань

ройового застосування ударних БпЛА [14], логіко-часову модель ройового застосування ударних БпЛА, яка була розроблена та опублікована авторами у [14, 15]. Було показано, що процес ройового застосування рою БпЛА має значну кількість етапів, які за змістом та принципами розв'язання завдань значно відрізняються. Найбільш суттєвими проблемними питаннями є: складність та різноманітність алгоритмів ройової взаємодії БпЛА-агентів у складі рою; необхідність адаптивного комбінування централізованого та децентралізованого способів управління роєм на основі принципів самоорганізації; складність організації децентралізованого (без участі оператора) інформаційного обміну між БпЛА-агентами у складних умовах обстановки; складність вирішення завдань розпізнавання ситуацій або конкретних цілей; необхідність адаптивного вибору алгоритмів цілерозподілу ударних БпЛА рою з урахуванням умов обстановки та набору критеріїв (пріоритет цілей, їх доступність та захищеність, час на прийняття рішення тощо). Водночас, алгоритми мають оперативно коригуватись у реальному масштабі часу залежно від зміни поточної ситуації (втрати частини БпЛА, маневру цілей, навісної невогневої протидії тощо). Зазначене потребуватиме інтеграції програмного забезпечення усіх агентів рою БпЛА для забезпечення координації їх взаємного положення, перенацілювання та керування корисним навантаженням тощо. Важливість проблеми цілерозподілу полягає в тому, що від нього залежить ефективність, живучість і економічність рою ударних БпЛА. Це одна з основних задач для розвитку ройових технологій та їх впровадження у Збройних Силах України.

Зазначені проблемні питання мають ураховуватись під час моделювання усіх відповідних процесів, які відбуваються на кожному з етапів логіко-часової моделі [15], яку представлено у вигляді діаграми Ганта, що описує послідовність зазначених етапів у часі (рис. 1). Слід зазначити, що з точки зору мети бойового застосування рою ударних БпЛА (ураження максимальної кількості об'єктів ГЦ за умови раціонального використання ресурсу рою) найбільш суттєвими є етапи (див. рис. 1, етапи 9–13), які передбачають послідовне вирішення завдань щодо: виявлення та розпізнавання (ідентифікації) цілей заданих класів; вибору алгоритму управління цілерозподілом рою БпЛА; атаки ідентифікованих цілей; оцінки (контролю) результатів ураження цілей.

З урахування цього, на діаграмі Ганта продемонстровано найбільш суттєві етапи застосування рою ударних БпЛА (позначено прямокутником червоного кольору), на яких відбуваються процеси, що потребують першочергової уваги під час математичного моделювання процесів застосування рою ударних БпЛА.

Крім того, виділені на діаграмі Ганта найбільш суттєві етапи відповідають класичній моделі

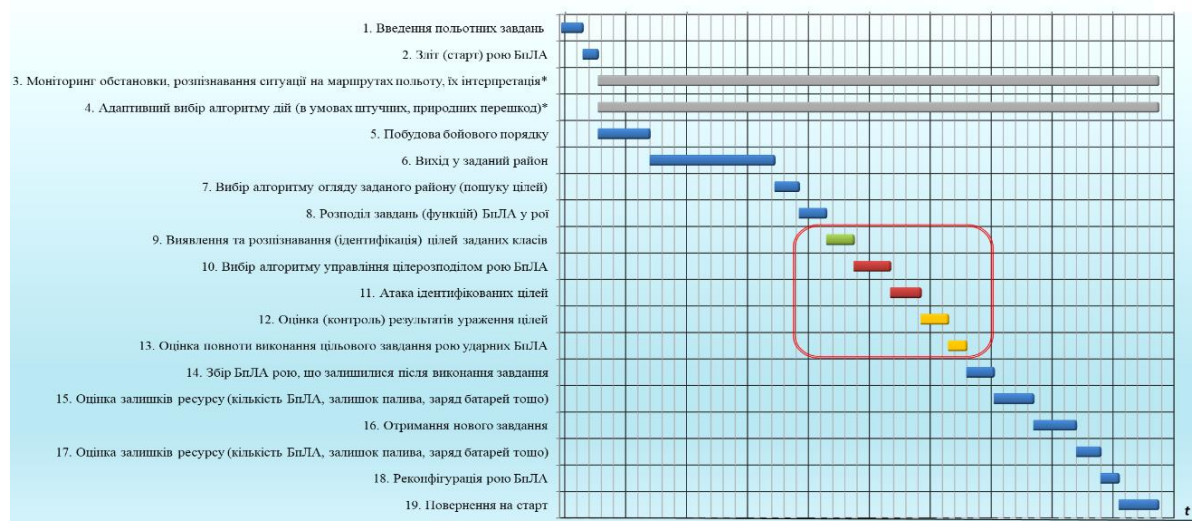
застосування засобів ураження – “розвідка-ураження-оцінка”. Зазначене підкреслює актуальність обраної теми дослідження.

На рис. 1 показано, що етап 9 – етап, пов’язаний з підготовкою рою ударних БПЛА до ураження, що передбачає розв’язання задач кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об’єктів групових цілей і потребує розроблення відповідних нейромережових моделей.

Етапи 10 та 11 – безпосередньо пов’язані з

виконанням завдань ураження цілей, що потребує моделювання процесу цілерозподілу рою різнотипних ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ противника, які можуть містити різнорідні об’єкти.

Етапи 13 та 14 – передбачають оцінювання (контроль) результатів ураження об’єктів ГЦ та оцінювання повноти виконання цільового завдання рою ударних БПЛА), що має бути ураховано у розроблюваних математичних моделях.



Умовні позначення:

- – етап виявлення та розпізнавання (ідентифікації) – підготовчий етап
- – етапи безпосереднього застосування рою ударних БПЛА для ураження цілей
- – етапи, на яких здійснюється оцінка (контроль) результатів ураження цілей та оцінка повноти виконання цільового завдання рою ударних БПЛА

Заходи, позначені сірим кольором, виконуються безперервно протягом усього часу від зльоту до завершення виконання цільового завдання групою (роєм) БПЛА.

Рисунок 1 – Логіко-часова модель застосування рою ударних БПЛА у вигляді діаграми Ганта (варіант)

З урахуванням зазначеного, на рис. 2 представлено розроблену математичну модель застосування рою ударних БПЛА для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту.

Математична модель містить 5 взаємопов’язаних модулів: модуль 1 – передбачає формування вхідних даних; модулі 2 та 3 – є нейронними мережами кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об’єктів групових цілей; модуль 4 – передбачає формування матриці ефективності ураження j -го класу об’єкта групової цілі i -м класом БПЛА; модуль 5 – є математичною моделлю динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних БПЛА по об’єктах нестационарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності.

Розглянемо більш детально складові розробленої математичної моделі, яка поєднує оптимізаційні методи та елементи штучного інтелекту.

У модулі 1 представлено вхідні дані, обмеження та припущення.

Завдання рою ударних БПЛА: ураження різнорідних об’єктів групової цілі ГЦ. Для досягнення максимального збитку ГЦ необхідно раціонально розподілити ударні БПЛА.

Вхідні дані для кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об’єктів ГЦ: $\vec{p}$ – вектор характеристик ударних БПЛА; $\vec{y}$ – вектор розподілу ударних БПЛА за класами; $\vec{d}$ – вектор характеристик об’єктів ГЦ; k_{cl} – кількість кластерів ударних БПЛА, K – кількість кластерів об’єктів ГЦ; $\vec{z}$ – вектор розподілу об’єктів ГЦ за класами; f_1, f_2 – функції активації для нейронів у прихованому та вихідному шарах; W, φ – вагові коефіцієнти НМ класифікації ударних БПЛА та об’єктів ГЦ; $\vec{a}, \vec{b}$ – вектори зміщення НМ класифікації об’єктів ГЦ та ударних БПЛА; $k_{БПЛА}, k_{ГЦ}$ – кількість класів БПЛА та об’єктів ГЦ.

Вхідні дані щодо рою ударних БПЛА: i – типи БПЛА; m – кількість типів БПЛА; N_i – кількість БПЛА i -го типу; k – тип суброю БПЛА; m_i – маса бойової частини БПЛА i -го типу; k_b – коефіцієнт втрат БПЛА, які можуть виникати унаслідок вогневої або радіоелектронної протидії противника; m_k – сумарна маса бойових частин (БЧ) БПЛА i -их типів, об’єднаних у субрій k -го типу.

Вхідні дані щодо противника: групова ціль противника, у складі якої є неоднорідні точкові об’єкти, що підлягають ураженню: j – типи об’єктів у складі групової цілі, $j = \overline{1, n}$; n – кількість типів об’єктів; N_{oj} – кількість об’єктів

ураження j -го типу у складі групової цілі; M_{oj} – об'єкта j -го типу.
мінімальна маса БЧ, достатня для ураження

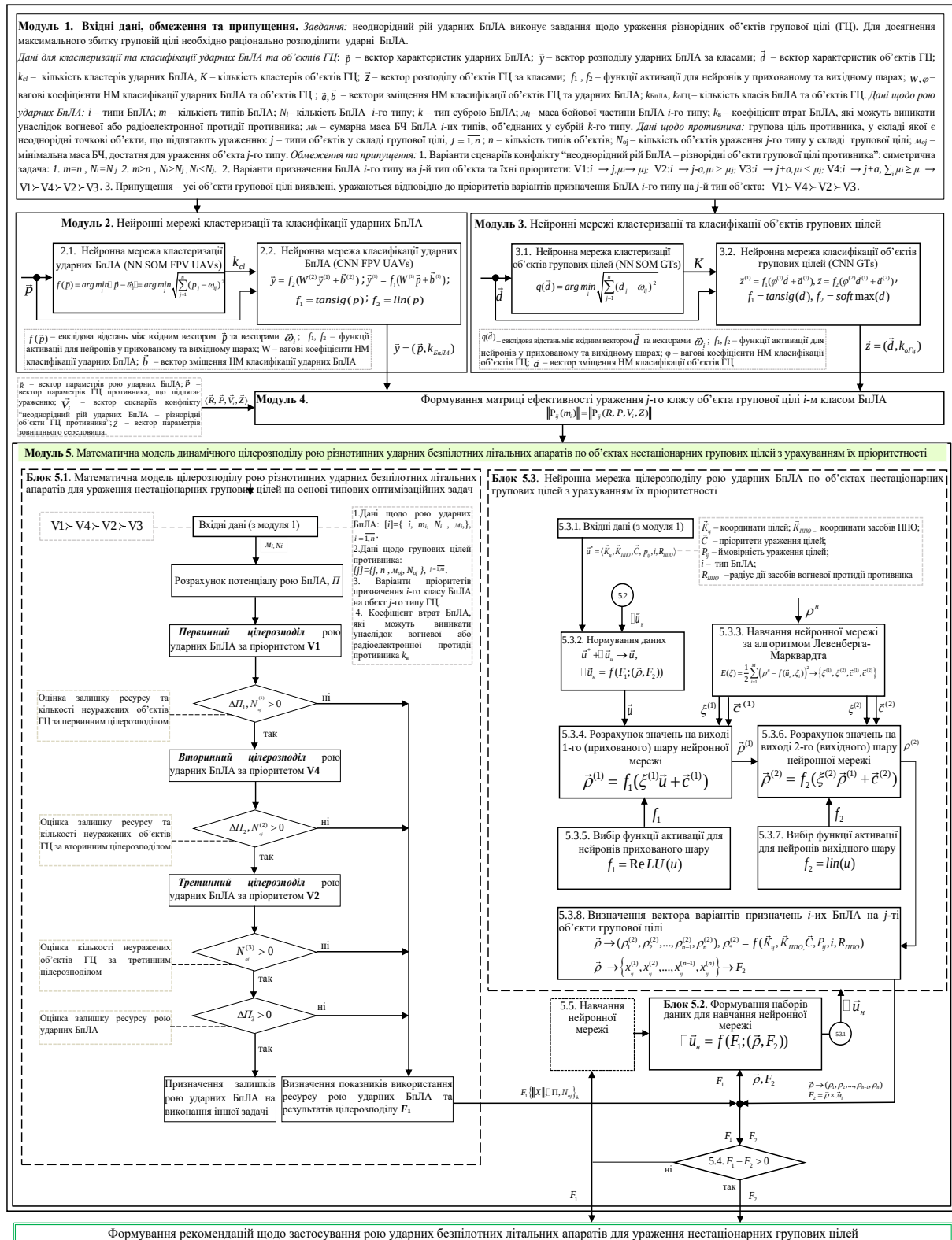


Рисунок 2 – Математична модель застосування рою ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту

Обмеження та припущення:

1. Варіанти сценаріїв конфлікту “неоднорідний рій БпЛА – різні об'єкти групової цілі

противника”: симетрична задача: 1. $m=n$, $N_i=N_j$; 2. $m>n$, $N_i>N_j$, $N_i<N_j$.

2. Варіанти призначення БпЛА i -го типу на j -й тип об'єкта та їхні пріоритети: $V_1: i \rightarrow j, \mu_i \rightarrow \mu_j$; $V_2: i \rightarrow j - a, \mu_i > \mu_j$; $V_3: i \rightarrow j + a, \mu_i < \mu_j$; $V_4: i \rightarrow j + a, \sum_i \mu_i \geq \mu \rightarrow V_1 > V_4 > V_2 > V_3$.

3. Припущення – усі об'єкти групової цілі виявлені й уражаються відповідно до i -го типу на j -й тип об'єкта: $V_1 > V_4 > V_2 > V_3$ (табл. 1).

Таблиця 1

Пріоритети варіантів призначення БпЛА

Варіант	Зміст варіанта пріоритету призначення
V ₁	гарантоване ураження об'єкта j -го типу i -м типом БпЛА (маса БЧ є достатньою для ураження об'єкта ГЦ): $m_i = m_j, i \rightarrow j; \{1 \rightarrow 1, \dots, m \rightarrow n\}$
V ₂	призначення “важких” БпЛА i -их типів на більш “легкий” (більш простий) об'єкт j -го типу ГЦ (маса БЧ значно перевищує масу, потрібну для ураження об'єкта ГЦ): $i \rightarrow j - a, \mu_i > \mu_j$
V ₃	призначення “легкого” БпЛА i -го типу на більш “важкий” об'єкт j -го типу групової цілі (нерациональний варіант, за якого не забезпечується ураження об'єктів ГЦ) $(i \rightarrow j + a, \mu_i < \mu_j)$
V ₄	формування суброїв (забезпечує одночасне призначення декількох “легких” БпЛА i -их типів на більш “важкий” об'єкт j -го типу групової цілі за умови, що сумарна маса бойових частин БпЛА у складі суброю буде достатньою для ураження об'єктів відповідного типу: $(i \rightarrow j + a, a \in \mathbb{N}, \sum_i \mu_i \geq \mu_j)$

На підставі вхідних даних щодо рою ударних БпЛА та потенційних об'єктів ураження формуються дві групи класифікаційних ознак: перша – для кластеризації та класифікації ударних БпЛА (зокрема ураховуються параметри: маса бойової частини – $m_{бч}$, тактичний радіус БпЛА – r), друга – для кластеризації та класифікації об'єктів групових цілей.

Взаємопов'язані задачі кластеризації та класифікації ударних БпЛА та класифікації об'єктів групових цілей розв'язуються з метою встановлення відповідності певних класів ударних БпЛА, які забезпечуватимуть найбільш ефективне ураження певного класу об'єктів ГЦ. Зазначені задачі розв'язуються за допомогою нейронних мереж кластеризації та класифікації ударних БпЛА (модуль 2) та кластеризації та класифікації об'єктів групових цілей (модуль 3).

Нейронна мережа (модуль 2) складається з двох блоків: блок 2.1 – нейронна мережа кластеризації ударних БпЛА; блок 2.2 – нейронна мережа класифікації ударних БпЛА. Обидві НМ дозволяють за вектором характеристик ударних БпЛА $\vec{p}$ здійснити їх розподіл за класами та отримати вектор класів ударних БпЛА – $\vec{j} = (\vec{p}, k_{\text{БпЛА}})$.

Подібним чином у блоках 3.1 та 3.2 (модуль 3), які, відповідно, є нейронними мережами кластеризації та класифікації об'єктів ГЦ, за вектором їх характеристик $\vec{d}$ здійснюється кластеризація та класифікація об'єктів ГЦ з

отриманням вектора класів об'єктів ГЦ $\vec{z} = (\vec{d}, k_{\text{огц}})$.

У модулі 4 – на підставі отриманих результатів класифікації БпЛА та об'єктів ГЦ формується матриця ефективності ураження j -го класу об'єкта групової цілі i -м класом БпЛА – $\|P_{ij}(m_i)\| = \|P_{ij}(R, P, V_i, Z)\|$, де $\vec{R}$ – вектор параметрів рою ударних безпілотнох літальних апаратів; P – вектор параметрів групової цілі противника, що підлягає ураженню; V_i – вектор сценаріїв конфлікту “неоднорідний рій ударних БпЛА – різномірні об'єкти групової цілі противника”; Z – вектор параметрів зовнішнього середовища. Зазначена матриця встановлює правила призначення БпЛА на відповідні об'єкти ГЦ.

Модуль 5 – представляє собою математичну модель динамічного цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по об'єктах нестационарних групових цілей з урахуванням їх пріоритетності.

Оснoву цієї математичної моделі складають:

математична модель цілерозподілу рою різномірних ударних безпілотнох літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей на основі типових оптимізаційних задач (блок 5.1);

нейронна мережа цілерозподілу рою ударних безпілотнох літальних апаратів по об'єктах нестационарних групових цілей з урахуванням пріоритетності їх елементів (блок 5.3).

У блоці 5.1 на підставі вхідних даних (з модуля 1) визначається потенціал (ресурс) рою (Π); з урахуванням визначених пріоритетів варіантів призначення ударних БпЛА – $V_1 > V_4 > V_2 > V_3$ (табл. 1) розв'язуються задачі первинного, вторинного, третинного цілерозподілу рою ударних БпЛА з перевіркою після кожної ітерації умов переходу до наступного етапу цілерозподілу. При цьому після кожного етапу цілерозподілу здійснюється оцінка залишку ресурсу рою $\Delta\Pi_1, \Delta\Pi_2, \Delta\Pi_3$ та кількості неуразених об'єктів групових цілей $\{N_{oj}^{(1)}, N_{oj}^{(2)}, N_{oj}^{(3)}\}$.

У результаті розв'язання задач цілерозподілу розраховуються показники використання ресурсу рою ударних БпЛА та узагальнення результатів цілерозподілу.

Задача цілерозподілу базується на типових постановках “задачі про призначення”, її детально викладено у статті [16] з урахуванням обраних пріоритетів призначення.

Розв'язання оптимізаційної задачі у блоці 5.1 для різних k -варіантів вхідних даних дозволяє отримати вихідні параметри математичної моделі для k -варіантів вихідних параметрів – $F_1\{\|X\|, \Delta\Pi, N_{oj}\}_k$, де $\|X\|$ – матриця призначення; $\Delta\Pi$ – залишок ресурсу рою ударних БпЛА після трьох ітерацій цілерозподілу; N_{oj} – залишок неуразених об'єктів j -го типу групової цілі.

Отже, F_1 є результатом цілерозподілу БпЛА, який отримано за допомогою оптимізаційної задачі (блок 5.1).

На підставі отриманих результатів у блоці 5.2. здійснюється формування наборів навчальних даних для нейронної мережі динамічного цілерозподілу рою ударних безпілотнох літальних апаратів по об'єктах нестационарних групових цілей з урахуванням пріоритетності їх елементів (блок 5.3).

Нейронна мережа (блок 5.3) складається з 8 блоків, у яких на підставі вхідних даних $\vec{u} = \langle \vec{K}_w, \vec{K}_{ппо}, \vec{C}, p_{ij}, i, R_{ппо} \rangle$ (блок 5.3.1) та наборів для навчання нейронної мережі $\Delta \vec{u}_n = f(F_1; (\vec{p}, F_2))$ (блок 5.2) отримуються нормовані значення $\vec{u}^* + \Delta \vec{u}_n \rightarrow \vec{u}$ (блок 5.3.2).

У блоці 5.3.3 здійснюється навчання нейронної мережі за алгоритм Левенберга-Марквардта:

$$E(\xi) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (\rho^i - f(\vec{u}_n, \xi_i))^2 \rightarrow \{\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \vec{c}^{(1)}, \vec{c}^{(2)}\}$$

Для цього з урахуванням вибраних у блоках 5.3.5 та 5.3.7 функцій активації нейронів – $f_1 = ReLU(u)$ та $f_2 = \ln(u)$ у блоках 5.3.4 та 5.3.6 здійснюється розрахунок значень на виходах прихованого $\vec{p}^{(1)} = f_1(\xi^{(1)}\vec{u} + \vec{c}^{(1)})$ та вихідного шарів $\vec{p}^{(2)} = f_2(\xi^{(2)}\vec{p}^{(1)} + \vec{c}^{(2)})$ нейронної мережі, де $\xi^{(1)}, \xi^{(2)}$ – коефіцієнти НМ, $\vec{c}^{(1)}, \vec{c}^{(2)}$ – вектори зміщення на виходах прихованого та вихідного шарів НМ.

З урахуванням зазначеного у блоці 5.3.8. визначаються варіанти призначень БПЛА на об'єкти групової цілі:

$$\vec{p} \rightarrow (\vec{p}_1^{(2)}, \vec{p}_2^{(2)}, \dots, \vec{p}_{n-1}^{(2)}, \vec{p}_n^{(2)}),$$

$$\rho_*^{(2)} = f(\vec{K}_w, \vec{K}_{ппо}, \vec{C}, p_{ij}, i, R_{ппо}),$$

$$\vec{p} \rightarrow \{x_{ij}^{(1)}, x_{ij}^{(2)}, \dots, x_{ij}^{(n-1)}, x_{ij}^{(n)}\} \rightarrow F_2$$

Де $F_2 - \epsilon$ результатом цілерозподілу БПЛА отриманий за допомогою нейронної мережі (блок 5.3).

У блоці 5.4 порівнюються результати розв'язання задачі цілерозподілу, отримані у блоках 5.1 та 5.3, зокрема значення цільових функцій F_1 та F_2 .

Залежно від результатів перевірки умови $\|F_2 - F_1\| \leq \epsilon$ приймається рішення, по-перше, яка з двох моделей цілерозподілу ("алгоритмічна" модель або "нейромережева модель") здійснює цілерозподіл оптимально, по-друге, яку з цих моделей брати за основу для формування рекомендацій щодо підвищення ефективності застосування рою ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ.

Якщо виконується умова $\|F_2 - F_1\| \leq \epsilon$, де ϵ – критерій оптимальності цілерозподілу, тоді використовуються результати цілерозподілу, отримані за допомогою нейронної мережі у блоці 5.3. Зазначимо, що у найпростішому варіанті значення критерію оптимальності цілерозподілу можна прийняти близьким до нуля ($\epsilon \rightarrow 0$), що свідчить про достатню навченість нейронної мережі.

Якщо $\|F_2 - F_1\| > \epsilon$ – використовуються результати цілерозподілу, отримані за допомогою математичної моделі на основі оптимізаційної задачі (блок 5.1) та приймається рішення про донавчання нейронної мережі (блок 5.5), для чого у блоці 5.2 здійснюється уточнення наборів навчальних даних. Навчання НМ цілерозподілу рою ударних БПЛА по об'єктах ГЦ з урахуванням їх пріоритетності завершується за виконання умови, зазначеної у блоці 5.4.

Результати, отримані за допомогою розробленої математичної моделі, яка поєднує два взаємопов'язані способи розв'язання задачі динамічного цілерозподілу рою ударних БПЛА (на основі типових оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі), використовуються для формування рекомендацій щодо бойового застосування рою ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ.

Таким чином, розроблена математична модель застосування рою ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ із використанням елементів штучного інтелекту дозволяє сформувати рекомендації щодо застосування роїв ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ.

Новизна математичної моделі полягає в тому, що: застосування рою ударних БПЛА моделюється як комплекс пов'язаних процесів:

1) кластеризації та класифікації ударних БПЛА та об'єктів ГЦ, що дозволяє сформувати матрицю ефективності ураження об'єктів ГЦ певним класом БПЛА, яка надалі враховується в процесі розподілу ресурсу рою ударних БПЛА;

2) динамічного цілерозподілу рою різнотипних ударних БПЛА по об'єктах нестационарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності на основі типових оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі, за якого забезпечується максимальний збиток ГЦ з урахуванням пріоритетів ураження об'єктів ГЦ, прикриття їх засобами ППО, імовірності їх ураження та досяжності для ударних БПЛА рою.

При цьому математична модель цілерозподілу різнотипних ударних БПЛА для ураження нестационарних ГЦ на основі типових оптимізаційних задач базується на класичних постановках оптимізаційних задач розподілу неоднорідних ресурсів, зокрема на ітераційних процедурах "задачі про призначення" з урахуванням запропонованих пріоритетів варіантів призначення ударних БПЛА на об'єкти ГЦ, та обмежень на призначення БПЛА (за масою їх БЧ), що дає змогу: 1) раціонально використати ресурс рою ударних БПЛА; 2) сформувати на основі методів комбінаторного аналізу варіантів суброїв ударних БПЛА для ураження складних об'єктів, що забезпечить додаткове цільове використання ресурсу рою ударних БПЛА та ураження максимальної кількості об'єктів ГЦ.

Крім того, зазначена математична модель на основі оптимізаційних задач використовується для формування наборів навчальних даних нейронної мережі цілерозподілу рою ударних БПЛА по

об'єктах нестаціонарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності, а також може бути використана при малих розмірностях задачі цілерозподілу.

Отже, розроблена математична модель застосування рою ударних БпЛА для ураження нестаціонарних ГЦ із використанням елементів штучного інтелекту дозволяє описувати найбільш суттєві процеси застосування рою ударних БпЛА під час автономного застосування роїв ударних БпЛА, коли завдання вирішуються в умовах критичного часу та без участі оператора.

Обговорення

Отримані результати підтверджують актуальність проблеми математичного опису процесів застосування роїв ударних БпЛА, а також доцільність поєднання методів цілерозподілу ударних БпЛА на основі оптимізаційних задач та навчених нейронних мереж, що дозволяє завдяки адаптації до швидкозмінних умов обстановки вирішувати завдання динамічного цілерозподілу неоднорідних роїв ударних БпЛА по різномірних об'єктах нестаціонарних ГЦ.

У попередніх дослідженнях цілерозподіл переважно розглядався як задача оптимізації для фіксованих параметрів групи та об'єктів групової цілі, за умов, коли один БпЛА призначається на лише одну ціль. Проте в реальних умовах бойової обстановки склад рою БпЛА та об'єктів групових цілей можуть змінюватися в масштабі реального часу. Розроблена математична модель дає можливість урахувати такі динамічні зміни та формувати варіанти призначень різномірних ударних БпЛА на різномірні об'єкти нестаціонарних ГЦ.

При цьому матриця ефективності ураження об'єктів ГЦ певними типами БпЛА, яка формується на основі розв'язання задач кластеризації та класифікації ударних БпЛА і об'єктів групової цілі, дозволяє завдяки введенню “обмежень на призначення” скоротити час підготовки рою ударних БпЛА до бойового застосування для ураження об'єктів групових цілей противника.

Підкреслимо, що розроблена у *блоці 5.1.* математична модель дає змогу алгоритмічно розв'язати задачу оптимального цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по об'єктах нестаціонарної групової цілі противника та забезпечує ураження максимальної кількості об'єктів ГЦ з раціональним використанням ресурсу рою (сумарної маси бойових частин ударних БпЛА). Математична модель враховує чотири основні сценарії несиметричного конфлікту “неоднорідний рій БпЛА – різномірні об'єкти групової цілі противника” та їх пріоритетність

$$V_1 > V_4 > V_2 > V_3.$$

Розроблена у *блоці 5.3.* нейронна мережа цілерозподілу враховує: пріоритети ураження об'єктів групових цілей, їх прикриття засобами ППО, імовірності їх ураження та досяжність для ударних БпЛА рою. Слід зазначити, що використання “нейромережевої моделі” є

доцільним за умов: значної розмірності задачі цілерозподілу, коли оптимізаційна задача не дозволяє оперативно отримати результати цілерозподілу, що зумовлено різким зростанням кількості обчислювальних процедур; неповноти вхідних даних про об'єкти ГЦ противника в умовах невизначеності.

Висновки

Отже, у статті розроблено математичну модель застосування рою ударних БпЛА для ураження нестаціонарних групових цілей із використанням штучного інтелекту, яка поєднує: нейронні мережі кластеризації та класифікації ударних БпЛА і об'єктів групових цілей, на основі яких отримується матриця ефективності ураження об'єктів ГЦ певним класом ударних БпЛА; математичну модель динамічного цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по об'єктах нестаціонарних ГЦ з урахуванням їх пріоритетності, яка включає дві взаємопов'язані математичні моделі – на основі оптимізаційних задач та навченої нейронної мережі.

Показано, що поєднання алгоритмічних та нейромережових підходів дозволяє розв'язувати задачу цілерозподілу рою різномірних ударних БпЛА по різномірних об'єктах нестаціонарної ГЦ у реальному масштабі часу з урахуванням зміни складу групової цілі та рою ударних БпЛА.

Розроблена математична модель дає можливість визначати показники використання ресурсу рою ударних БпЛА та результатів цілерозподілу (матриця призначення ударних БпЛА, кількість неуразених об'єктів ГЦ), що є основою для формування рекомендацій щодо застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестаціонарних ГЦ.

Подальшими напрямками досліджень можуть бути побудова алгоритмів оптимального цілерозподілу рою ударних БпЛА для ураження нестаціонарних ГЦ, розроблення математичних моделей формування суброїв ударних БпЛА на основі поєднання оптимізаційних та комбінаторних задач, обґрунтування критеріїв оптимальності цілерозподілу та рекомендацій щодо підвищення ефективності застосування роїв ударних БпЛА, порівняння інших постановок оптимізаційних задач розподілу неоднорідних ресурсів з метою формування додаткових наборів даних для навчання нейронної мережі цілерозподілу.

Матеріали, представлені у статті, можуть бути корисними для службових осіб органів управління Сил безпілотної системи Збройних Сил України, наукових та науково-педагогічних працівників, які проводять дослідження у галузі застосування безпілотної системи, математичного моделювання складних систем воєнного призначення, а також здобувачів вищої освіти, які вивчають зазначені питання.

Список використаних джерел

1. Про рішення РНБО від 20 серпня 2021 року “Про Стратегічний оборонний бюлетень України”. Указ Президента України від 17.09.2021 р. № 473/2021. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0063525-21#Text> (дата звернення: 04.01.2025).

2. Класифікація безпілотної літальних апаратів у складі безпілотної авіаційних комплексів (систем) у ЗС України. Київ: ЦНДІ ЗС України, 2024.

3. Візія Повітряних Сил 2035. Міністерство оборони України. Командування ПС ЗСУ. 2020. 39 с.

4. Стратегія розвитку Повітряних Сил на період до 2035 року: наказ Головнокомандувача Збройних Сил України. Київ: МОУ, КПС ЗСУ, 2020. 36 с.

5. Про нарощування спроможностей сил оборони. Указ Президента України від 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (дата звернення: 10.10.2024)/

6. Горбулін В. П., Мосов С. П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. Вісн. НАН України. 2024. № 3. С. 3–11.

7. Мартинюк О. Р., Медведєв В. К. Підхід до формування колективних задач при груповому застосуванні безпілотної авіації. Повітряна міць України. 2024. № 2 (7). С. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-80-86>.

8. Голембо В. А., Мельников Р. Г. Організація роботи групи безпілотної літальних апаратів. Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”, 2018. С. 53–63.

9. Журавська І. М. Синтез маршрутів суброїв безпілотної авіації з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження територій. Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2017. № 3. С. 86–94.

10. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотної літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. Дис. ... канд. техн. наук:

05.13.06. Харків: ХНУПС, 2020. 192 с.

11. Житецький Л. С. Методи управління і оцінювання в умовах невизначеності. Проблеми керування та інформатики. 2023. № 5. С. 47–63.

12. Компанієць О. М., Ключніков І. М., Дмитрієв А. Г. Комплексний аналіз впливу факторів на ефективність управління роями безпілотної літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 3 (75). С. 66–70.

13. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. Розпорядження КМ України від 02.12.2020 № 1556-р. Ред. від 29.12.2021, підстава – 1787-2021-р. URL: <http://surl.li/lhdyyf>.

14. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Проблемні питання ройового застосування ударних безпілотної літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. № 3 (48). С. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.

15. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Розроблення логіко-часової моделі ройового застосування ударних безпілотної літальних апаратів з урахуванням типових способів їх групового застосування в сучасних умовах. Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України. 2024. № 3 (83). С. 108–116.

16. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Метод динамічного цілерозподілу неоднорідного роя ударних безпілотної літальних апаратів на основі ітераційних процедур “задачі про призначення”. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2025. № 2 (53). С. 138–149. DOI:10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.

¹Ihor Shovkoshytnyi (Doctor of Technical Science, Senior Research Fellow)

<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

²Olha Vasylenko

<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF THE USE OF A SWARM OF STRIKE UNMANNED AERIAL VEHICLES TO ENGAGE NON-STATIONARY GROUP TARGETS USING ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article develops a mathematical model for the use of a swarm of strike unmanned aerial vehicles to engage non-stationary group targets of the enemy using elements of artificial intelligence, which, according to the presented Gantt chart, allows for the mathematical formalization of the most significant stages of the use of a swarm of strike unmanned aerial vehicles (detection and recognition (identification) of targets of specified classes; selection of an algorithm for controlling the target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles; attack on identified targets; evaluation (control) of the results of target destruction). The mathematical model combines: neural networks for clustering and classification of strike unmanned aerial vehicles and group target objects, on the basis of which a matrix of the effectiveness of striking group target objects with a certain class of strike unmanned aerial vehicles is obtained; a mathematical model of dynamic target distribution of a swarm of different types of strike unmanned aerial vehicles among non-stationary group targets, taking into account their priority, which includes two interrelated mathematical models – based on optimization tasks and a trained neural network.

It has been shown that the combination of algorithmic and neural network approaches allows solving the problem of target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles on heterogeneous objects of a non-stationary group target in real time, taking into account changes in the composition of the group target and the swarm of strike unmanned aerial vehicles. At the same time, the mathematical model of target distribution of a swarm of strike unmanned aerial vehicles for striking non-stationary group targets based on

optimization problems allows obtaining data sets for training a neural network of target distribution, which is used in the following cases: a significant task dimension, when the optimization task does not allow for the rapid obtaining of target distribution results; incompleteness of input data on enemy group targets in conditions of uncertainty.

In addition, the developed mathematical model takes into account: the main scenarios of asymmetric conflict “heterogeneous swarm of unmanned aerial vehicles – heterogeneous enemy group target objects” and the priority of assignment options; the priorities for striking group target objects, their coverage by air defense systems, the probability of their destruction, and their reachability for strike unmanned aerial vehicles in the swarm.

Key words: mathematical model, application of a swarm of strike unmanned aerial vehicles, neural network, strike efficiency, non-stationary group target, dynamic target distribution, optimisation, clustering, classification, artificial intelligence, swarm resource, strike priorities, assignment options.

References

1. Pro rishennia RNBO vid 20 serpnia 2021 roku “Pro Stratehichniy oboronnyi biuletyn Ukrainy”. Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 17.09.2021 r. № 473/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0063525-21#Text> (data zvernennia: 04.01.2025).
2. Klyasyfikatsiia bezpilotnykh litalnykh aparativ u skladi bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv (system) u ZS Ukrainy. Kyiv: TsNDI ZS Ukrainy, 2024.
3. Viziiia Povitrianykh Syl 2035. Ministerstvo oborony Ukrainy. Komanduvannia PS ZSU. 2020. 39 s.
4. Stratehiia rozvytku Povitrianykh Syl na period do 2035 roku: nakaz Holovnokomanduvacha Zbroinykh Syl Ukrainy. Kyiv: MOU, KPS ZSU, 2020. 36 s.
5. Pro naroshchuvannia spromozhnosti syl oborony. Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (data zvernennia: 10.10.2024)
6. Horbulin V. P., Mosov S. P. Roi droniv – kulminatsiia dronizatsii voien. Visn. NAN Ukrainy. 2024. № 3. S. 3–11.
7. Martyniuk O. R., Medvediev V. K. Pidkhid do formuvannia kolektyvnykh zadach pry hrupovomu zastosuvanni bezpilotnoi aviatsii. Povitriana mits Ukrainy. 2024. № 2 (7). S. 80–86. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-80-86>.
8. Holembo V. A., Melnikov R. H. Orhanizatsiia roboty hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ. Lviv: Nats. un-t “Lvivska politekhnika”, 2018. S. 53–63.
9. Zhuravska I. M. Syntez marshrutiv subroiv bezpilotnykh aparativ z vykorystanniam neuronnoi merezhi Khopfilda dlia obstezhennia terytorii. Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. 2017. № 3. S. 86–94.
10. Berezhnyi A. O. Metody ta informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho planuvannia marshrutiv polotiv bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia pidvyshchennia efektyvnosti poshuku obektiv. Dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06. Kharkiv: KhNUPS, 2020. 192 s.
11. Zhytetskyi L. S. Metody upravlinnia i otsiniuvannia v umovakh nevyznachenosti. Problemy keruvannia ta informatyky. 2023. № 5. S. 47–63.
12. Kompaniets O. M., Kliushnikov I. M., Dmytriiev A. H. Kompleksnyi analiz vplyvu faktoriv na efektyvnist upravlinnia roiamy bezpilotnykh litalnykh aparativ. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2023. № 3 (75). C. 66–70.
13. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini. Rozporiadzhennia KM Ukrainy vid 02.12.2020 № 1556-r. Red. vid 29.12.2021, pidstava –1787-2021-r. URL: <http://surl.li/lhdyyf>.
14. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Problemni pytannia roiovoho zastosuvannia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. 2024. № 3 (48). S. 27–34. DOI:10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34.
15. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Rozroblennia lohiko-chasovoi modeli roiovoho zastosuvannia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ z urakhuvanniam typovykh sposobiv yikh hrupovoho zastosuvannia v suchasnykh umovakh. Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy. 2024. № 3 (83). S. 108–116.
16. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Metod dynamichnoho tsilerozpodilu neodnorodnoho roiu udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi iteratsiinykh protsedur “zadachi pro pryznachennia”. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony. 2025. № 2 (53). S. 138–149. DOI:10.33099/2311-7249/2025-53-2-138-149.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВЗАЄМОДІЇ ПІД ЧАС ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН ТА ПІДРОЗДІЛІВ ПОВІТРЯНИХ СИЛ, СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК, ВІЙСЬКОВО-МОРСЬКИХ СИЛ, ДЕСАНТНО-ШТУРМОВИХ ВІЙСЬК ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ ТА ІНШИХ ВІЙСЬКОВИХ ФОРМУВАНЬ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-57-63

УДК 355.424.4

Резнік Дмитро Вікторович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-3980-923x>

Паталаха Валерій Григорович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-3105-4402>

Глоба Олександр Володимирович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-1423-8365>

Шкурят Богдан Жоржович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ КОНФЛІКТІВ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ СИЛ І ЗАСОБІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

У статті досліджується можливість застосування теорії конфліктів для підвищення ефективності організації взаємодії сил і засобів протиповітряної оборони України. На основі розглянутого актуального бойового досвіду російсько-української війни, особливостей багаторівневої та технічно різномірної архітектури системи протиповітряної оборони, а також викликів, пов'язаних з протидією різномісним засобам повітряного нападу, в тому числі балістичним ракетами та дронами-камікадзе виділено чотири ключові підходи теорії конфліктів – теорію ігор, структурний підхід, теорію управління конфліктами та концепцію обмеженої раціональності. Визначені та обґрунтовані рекомендації щодо їх інтеграції у автоматизовані системи управління протиповітряною обороною та підготовку особового складу, що сприятимуть формуванню адаптивної, конфліктно-стійкої системи протиповітряної оборони, здатної ефективно діяти в умовах сучасної багатодоменої війни.

Ключові слова: протиповітряна оборона, теорія конфліктів, теорія ігор, управління конфліктами, структурний конфлікт, обмежена раціональність, бойове управління, система протиповітряної оборони України.

Вступ

Російсько-українська війна, що триває з 2014 року і набула повномасштабного характеру з 2022 року, радикально трансформувала підходи до організації протиповітряної оборони (ППО). Унікальність сучасного збройного конфлікту полягає у безпрецедентній інтенсивності та різномірності застосування засобів повітряного нападу (ЗПН) – від оперативно-тактичних балістичних ракет, крилатих ракет та керованих авіабомб до масованих атак дронів-камікадзе, баражуючих боеприпасів і малорозмірних безпілотних літальних апаратів [1-9]. У відповідь на ці загрози відбувається трансформація системи ППО, що базується на поєднанні радянських зразків зенітних ракетних комплексів (ЗРК) (С-300П, С-300В1, Бук-М1, С-125) із сучасними ЗРК іноземного виробництва (Patriot, Iris-T, NASAMS, Skyplex та інші) [9]. Це також стосується і винищувальної авіації (MiG-29, Су-27, F-16 та Mirage) і радіотехнічних військ (РТВ) [7-10].

Ці зміни сприяли формуванню складної,

багаторівневої та неоднорідної архітектури системи ППО, де засоби різного технічного рівня та тактичного призначення повинні діяти як єдина система. У таких умовах взаємодія набуває ключового значення, а недоліки її організації можуть призвести до дублювання зусиль, нерационального використання обмежених ресурсів або, навпаки, до створення “мертвих зон” у повітряному просторі та “дружного вогню”.

Метою статті є аналіз можливостей теорії конфліктів та обґрунтування доцільності її використання як інструменту аналізу й вдосконалення механізмів взаємодії в системі ППО, з урахуванням сучасного бойового досвіду.

Матеріали та методи

Сучасна система ППО України – це мережецентрична система, підсистеми якої включають елементи розвідки, управління, ураження та радіоелектронної боротьби (РЕБ) в представленні військовими частинами (підрозділами) Повітряних Сил ЗС України, ППО та армійської авіації Сухопутних військ ЗС України та інших

складових Сил оборони [10].

Ключовими проблемами спільного застосування елементів системи ППО є складність організації та здійснення взаємодії між ними, що виникає через низку конфліктів (причин), основними з яких є:

обмеженість ресурсів (ракет, радарів, засобів енергоживлення тощо);

різномірність програмного забезпечення і стандартів управління;

визначення пріоритетів прикриття (стратегічні об'єкти, енергетика, війська, цивільне населення);

необґрунтованість прийнятих рішень, що унеможлиблює довготривалу ефективну координацію спільних дій [3, 5].

В таких умовах виникає системний конфлікт інтересів між підсистемами ППО, що впливає на ефективність реагування на загрози в повітряному просторі. У зв'язку з цим, до аналізу ефективності її функціонування можливо застосовувати міждисциплінарний підхід, зокрема – концепції теорії конфліктів. “Теорія конфліктів” – міждисциплінарна галузь знань, що вивчає природу, динаміку, механізми й способи розв'язання конфліктних ситуацій між індивідами, групами або

системами [11]. У військовій сфері вона може забезпечити:

розглядати бойову обстановку як систему з багатьма гравцями й інтересами;

виявляти структурні та динамічні джерела суперечностей;

будувати моделі для прогнозування рішень у ситуаціях конфлікту.

Але, з-поміж усіх відомих підходів цієї теорії в статті буде розглянуто чотири, які найбільш підходять до розгляду проблемних питань, що виникають в сучасній системі ППО, а саме: “Теорія ігор”, “Структурна теорія конфлікту”, “Теорія управління конфліктами” та “Теорія обмеженої раціональності” (Табл. 1) [12-15]. Розглянемо можливість їх застосування з урахуванням специфіки функціонування ключових елементів системи ППО з використанням SWOT-аналізу, результати якого можуть надати можливостей обґрунтувати вибір релевантного напрямку теорії конфліктів, що може бути практично застосованим для адаптації та ефективного управління системою ППО в умовах сучасної війни.

Таблиця 1.

Найбільш релевантні підходи теорії конфліктів для системи ППО

Назва підходу	Сутність	Застосування у системі ППО	Приклад ситуації
Теорія ігор (Game Theory)	математичне моделювання стратегій гравців з конфліктними цілями	прогнозування дій противника; розподіл ЗРК; вибір оптимального варіанта застосування	розподіл ЗРК між цілями
Структурна теорія конфлікту (Structural Conflict Theory)	джерело конфлікту – внутрішні особливості організації	виявлення системних протиріч між підрозділами ЗРВ, авіацією, РТВ; усунення дублювання повноважень	несумісність ЗРК PATRIOT, NASAMS та С-300П, С-300В1 при спільному виконанні завдань з прикриття об'єктів
Теорія управління конфліктами (Conflict Management Theory)	конфлікти неминучі, але ними можна керувати	побудова алгоритмів врегулювання розбіжностей; розробка порядку спільних дій, особливо в одному повітряному просторі	зосередження зусиль двох засобів ППО на одній цілі шляхом визначення пріоритетів
Теорія обмеженої раціональності (Bounded Rationality)	рішення приймаються в умовах обмежень часу, інформації, ресурсу	створення евристичних правил ухвалення рішень для командирів; адаптація АСУ до роботи в умовах невизначеності	командиру потрібно приймати рішення не маючи повної інформації про повітряну обстановку

Інші відомі підходи “Теорії конфліктів” [12-15] такі як: “Теорія справедливості”, “Біхевіоральна економіка” та культурологічні моделі не розглядалися в контексті застосування в системі ППО так як вони, в загальному, мають обмежене застосування в реальному часі бойового управління, надто абстрактні або зосереджені на довгострокових змінах.

Результати

Для порівняння визначених для розгляду підходів, визначення їх позитивних та негативних сторін а також обмежень щодо їх використання

для організації взаємодії сил і засобів ППО можливо використати метод SWOT-аналізу [16-17].

Під час розгляду вищезазначених (таблиця 1) підходів за показниками SWOT-аналізу були визначені: “сильні сторони” (S (Strength)) – рівень позитивного впливу на ефективність ППО; “слабкості” (W (Weakness)) – інтенсивність/шкідливість слабких сторін; “можливості” (O (Opportunity)) – потенціал розвитку та адаптації та “загрози” (T (Threat)) – рівень ризику та визначено експертну оцінку та нормування значень їх сильних та слабких сторін.

“Теорія ігор” в загальному розумінні пропонує математичний апарат для моделювання стратегій взаємодії між раціональними “гравцями”. У

контексті системи ППО це дозволяє імітувати дії ЗПН і засобів їх ураження, визначати оптимальні рішення щодо розподілу цілей між різними засобами ураження, враховуючи обмежені ресурси, що надані для виконання поставлених завдань.

Результат SWOT-аналізу “Теорії ігор” (Табл. 2):

S (можливість моделювання взаємодії між гравцями, адаптація до автоматизованих систем управління (АСУ));

W (формалізована стратегічна логіка, потребує точних даних, погано працює при непередбачуваний поведінці складових системи);

O (автоматизація розподілу цілей, побудова тренажерів і симуляторів, підтримка рішень для командирів);

T (висока залежність від якості початкових умов, ризик спрощення складної бойової ситуації).

Таблиця 2

**Результати експертного оцінювання пунктів SWOT-аналізу підходу
Теорії конфліктів – “Теорії ігор”**

Категорія	Пункт	Оцінка
S	формалізована стратегічна логіка	0.9
	моделювання взаємодії	0.8
	добра адаптація до АСУ	0.9
W	передбачає повну раціональність	0.7
	потребує точних даних	0.6
	погано працює при непередбачуваний поведінці	0.8
O	автоматизація розподілу цілей	1.0
	побудова симуляторів	0.9
	підтримка рішень командирів	0.9
T	залежність від початкових умов	0.7
	ризик спрощення бойової ситуації	0.6

Отже, виходячи з результатів експертного оцінювання пунктів SWOT-аналізу (Таблиця 2) модель, що побудована на “Теорії ігор” має ключове обмеження щодо припущення про повну раціональність і обізнаність “гравців”, що суттєво знижує її прикладну цінність у реальних бойових діях. Така модель вразлива до непередбачуваної поведінки супротивника або збоїв у сенсорно-комунікаційній системі. Одним з шляхів усунення цих обмежень є доповнення цієї теорії концепцією обмеженої раціональності, що адаптує моделі до умов невизначеності та браку часу.

“Структурна теорія конфлікту” може дозволити виявити внутрішні протиріччя в архітектурі системи ППО – наприклад, між існуючими елементами (“радянськими” зенітними ракетними комплексами) та новими елементами систем (зенітними ракетними комплексами що надані

країнами партнерами), несумісністю АСУ чи дублюванням зон відповідальності елементів системи тощо.

Результат SWOT-аналізу “Структурної теорії конфлікту” (Таблиця 3):

S (виявляє глибинні суперечності в системі, добре підходить для довгострокового планування, сприяє реформуванню організаційних структур);

W (високий рівень абстракції, важко формалізується, не враховує динаміку бойових дій);

O (можливість розробки стратегій інтеграції методик управління з різних доктрин (НАТО та вітчизняна), підґрунтя для міжвідомчої взаємодії щодо ППО);

T (ігнорування короткострокових/оперативних викликів, ускладнення впровадження без підтримки командування).

Таблиця 4

**Результати експертного оцінювання пунктів SWOT-аналізу підходу Теорії конфліктів –
“Теорія управління конфліктами”**

Категорія	Пункт	Оцінка
S	покращення взаємодії та комунікації	0.9
	зменшення дублювання функцій	0.8
W	висока потреба у комунікаціях	0.6
	перевантаження каналів управління	0.7
O	протоколи взаємодії	0.9
	підвищення ефективності у коаліційних діях	0.8
T	сповільнення прийняття рішень	0.6
	конфлікт між командними рівнями	0.7

За результатами експертного оцінювання пунктів SWOT-аналізу (Таблиця 4) цей підхід дозволяє уникати дублювання ураження цілей, краще узгоджувати передачу цілевказівок і

делегувати повноваження. Проте в бойових умовах надмірна складність комунікацій може спричинити затримки у прийнятті рішень. Це можливо компенсувати через інтеграцію з агентно-

орієнтованими моделями та автоматизованими рішеннями, що знижують навантаження на персонал.

“Теорія обмеженої раціональності” започаткована Гербертом Саймоном, враховує, що в умовах браку часу, інформації та ресурсів рішення ухвалюються за принципом “достатності”, а не оптимальності. Це відображає реальний характер бойових дій у системі ППО, де командир (командувач) ухвалює рішення на основі фрагментованих даних.

Результат SWOT-аналізу “Теорії обмеженої раціональності” (таблиця 5):

S (враховує реальні обмеження людини, відповідає бойовим умовам, підходить для адаптивних та стресових сценаріїв);

W (суб’єктивізує моделі, складно забезпечує прогнозованість, потребує гнучкого інтерфейсу в АСУ);

O (використання у тренуванні операторів та командирів, впровадження у системи підтримки рішень);

T (ризик помилок у складних ситуаціях, неможливість забезпечити повну об’єктивність).

Таблиця 5

Результати експертного оцінювання пунктів SWOT-аналізу підходу Теорії конфліктів – “Теорія обмеженої раціональності”

Категорія	Пункт	Оцінка
S	враховує бойові реалії	1.0
	людський фактор	0.9
W	суб’єктивізація моделей	0.6
	складність прогнозування	0.7
O	навчання операторів	0.9
	гнучкі АСУ	0.8
T	ризик помилок	0.8
	втрата стратегічного бачення	0.7

Результат експертного оцінювання пунктів SWOT-аналізу (Таблиця 5) показує, що застосування “Теорії обмеженої раціональності” може створювати ризики фрагментарності мислення або втрати загального бачення ситуації. Тому її варто доповнювати структурною теорією або алгоритмами підтримки рішень із теорії ігор.

Отже, загальні результати SWOT-аналізу показують, що жоден з розглянутих релевантних напрямів теорії конфліктів не є універсальним. Однак їх комплементарність дозволить відкрити шлях до формування гібридної, гнучкої, багаторівневої моделі управління ППО, яка водночас враховує стратегічну логіку, організаційні обмеження, тактичні процедури та людський фактор і в якій синергія між стратегічними (іграми), організаційними (структурними), поведінковими (раціональність) і процесуальними (управління конфліктом) підходами дозволить максимально адаптуватися до умов багатодоменної війни.

Для визначення можливості та ступеня їх застосовності щодо організації взаємодії, проведемо узагальнення експертних оцінок значень сильних та слабких сторін кожного з чотирьох підходів теорії конфліктів у системі ППО. Такий підхід створює інноваційну основу для розробки нових принципів взаємодії та оптимізації бойового управління (рис. 1).

Таким чином, жоден з розглянутих релевантних напрямів теорії конфліктів, що можуть бути практично застосовані під час управління системою ППО, не може бути використаний самостійно але їх

інтеграція дозволить комплексно оцінити та організувати взаємодію між елементами системи ППО – від стратегічного рівня до тактичного в реальному часі. Це може бути використано як у моделюванні сценаріїв, так і у практичному регламентуванні рішень, включаючи налаштування АСУ, підготовку особового складу, розробку бойових документів тощо.

Обговорення

Отже, враховуючи багатокомпонентну структуру системи ППО України, інтенсивність повітряних загроз та обмеженість ресурсів, застосування елементів теорії конфліктів має бути не суто теоретичним, а спрямованим на конкретні управлінські, технічні та освітні рішення. Нижче наведено основні напрямки їх впровадження.

1. Вдосконалення організаційної взаємодії в системі ППО.

Вимагає створення єдиної доктрини конфліктно-стійкої взаємодії між ЗРВ, авіацією, РТВ, підрозділами РЕБ та іншими засобами ППО, що діятимуть у спільному повітряному просторі.

Потребує формалізації принципів управління конфліктами у бойових документах шляхом включення порядку визначення пріоритетів, порядку взаємного узгодження цілей та управлінських дій.

Проведення моделювання сценаріїв взаємодії в умовах конфлікту ресурсів з визначенням пріоритетних цілей, засобів ураження та об’єктів прикриття.

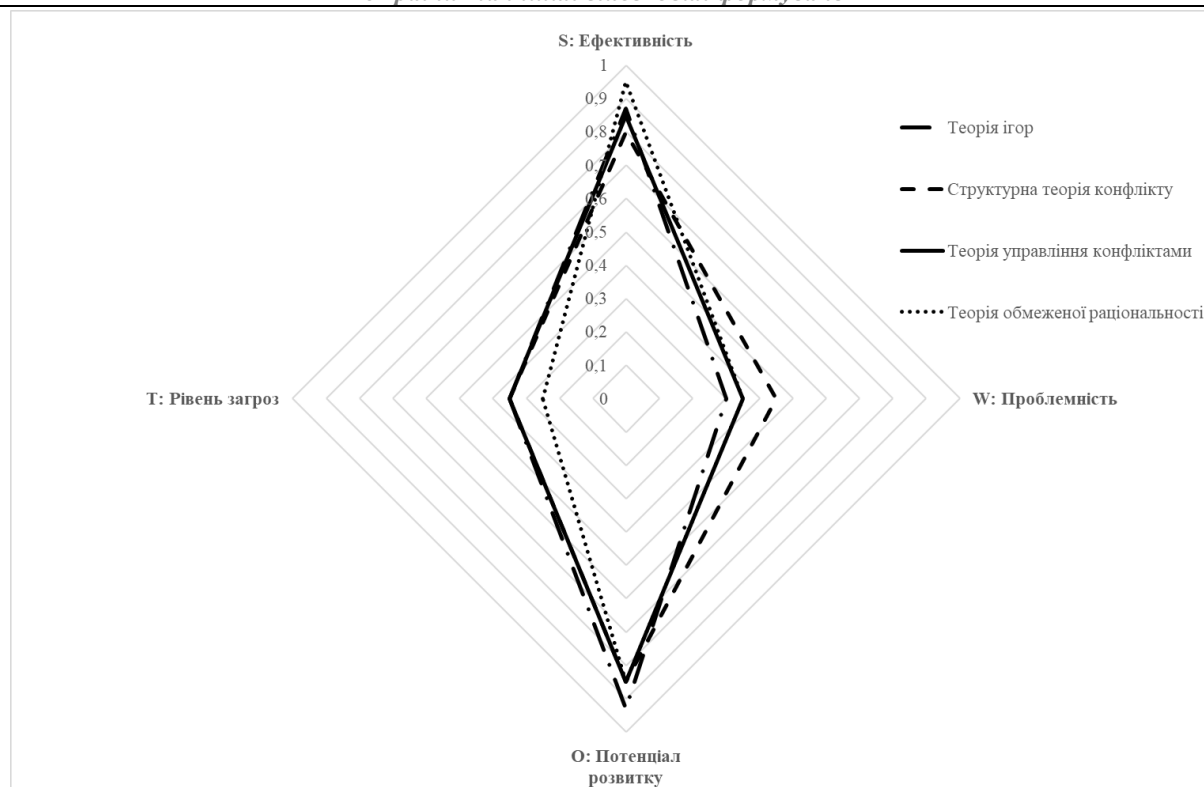


Рисунок 1 – Рівень оцінок позитивних та негативних категорій напрямів Теорії конфлікту

2. Модернізація автоматизованих систем управління.

Забезпечить інтеграцію модулів управління конфліктами в АСУ ППО, які виявлятимуть потенційні конфлікти у розподілі цілей, цільових каналів, секторів радіолокаційної розвідки та вогню тощо.

Використання алгоритмів теорії ігор (наприклад, мінімакс або Критерій Неша) для оптимізації алгоритмів бойового управління в складних умовах бойових дій забезпечить автоматизоване розмежування зон відповідальності із динамічним перерозподілом у реальному часі, на основі критеріїв (рівень загрози, ступень завантаження, доступність та ефективність застосування).

3. Підготовка та підвищення кваліфікації особового складу.

Вимагає включення в навчальні програми тематики вивчення та опрацювання ситуацій конфліктно-чутливої взаємодії та стратегій ухвалення рішень у багатодоменому середовищі.

Постійне тренування командирів і операторів засобів ППО на тренажерах із вбудованими конфліктними ситуаціями, що постійно оновлюються (наприклад суперечка за ціль між двома ЗРК, або рішення щодо черговості використання простору під час прикриття об'єктів).

Розробка практичних методичних рекомендацій для пунктів управління (як реагувати на внутрішні управлінські протиріччя під час управління бойовими діями).

4. Усунення конфлікту сумісності.

Уніфікація протоколів взаємодії з іноземними ЗРК (Patriot, NASAMS тощо) на основі принципів теорії структурного конфлікту (виявлення несумісностей і їх вирішення).

Розробка спільних стандартів ситуаційного управління під час спільного прикриття важливих об'єктів (наприклад, енергосистеми, аеропорти).

Аналіз конфліктів в управлінні на рівні “людина-АСУ” та “АСУ-АСУ”, що виникають у розподілених середовищах (наприклад, при роботі іноземної АСУ без прямої інтеграції в українську систему).

Отже, реалізація підходів теорії конфлікту в організації системи ППО дозволить не лише підвищити ефективність реагування на масовані та комбіновані повітряні удари, але й сформувати адаптивну, конфліктно-стійку модель управління, здатну функціонувати в умовах інформаційного перевантаження, технологічної різноманітності засобів та обмежених ресурсів, що особливо важливо під час забезпечення не лише технологічної, а й процедурної (організаційної) сумісності усіх компонентів системи ППО.

Висновки

Таким чином, В умовах сучасної війни система ППО України функціонує як складна багаторівнева, технічно та організаційно різноманітна структура, що перебуває під постійним впливом динамічного середовища. У таких умовах ефективна взаємодія між елементами системи ППО – ЗРВ, авіацією, РТВ, засобами РЕБ а також силами і засобами ППО інших складових Сил оборони – визначає здатність системи у цілому виконувати своє основне завдання: захист критичної

інфраструктури країни, важливих державних та військових об'єктів.

У дослідженні доведено, що складові теорії конфліктів, зокрема теорія ігор, структурний підхід, теорія управління конфліктами та концепція обмеженої раціональності, мають високий прикладний потенціал у військовій сфері. Їхнє комплексне впровадження дозволить:

аналітично виявляти зони ризику і суперечностей у системі ППО;

моделювати поведінку підсистем у конфліктних або обмежених ситуаціях;

будувати ефективні алгоритми координації, розподілу ресурсів та ухвалення рішень;

підвищити адаптивність системи ППО до нових типів загроз, зокрема масованих комбінованих атак із використанням безпілотних літальних апаратів, крилатих ракет, оперативно-тактичних ракетних комплексів тощо. Також, враховуючи динаміку бойових дій, обмеженість часу і ресурсів, а також складність прийняття рішень у стресових умовах, інституціоналізація принципів теорії конфліктів у системі ППО є необхідною умовою підвищення її стійкості, узгодженості та бойової ефективності. Тому, практична реалізація зазначених підходів має здійснюватися через вдосконалення АСУ, організаційної структури, навчання особового складу та регламентацію процедур взаємодії різнотипних компонентів.

Список використаних джерел

1. Доктрина ППО Збройних Сил України. Міністерство оборони України, 2023.
2. S. Shevchenko, "Air Defense Coordination Challenges in Hybrid Warfare," *Journal of Military Operations*, Vol. 18, No. 4, 2023.
3. Мельник І.В. Взаємодія сил ППО в умовах асиметричних загроз. – К.: НУОУ, 2022. – 135 с.
4. NATO Standardization Office. "Air and Missile Defense Interoperability Framework." AJP-3.3.3, 2021.
5. Б. Шкурат, О. Глоба, Д. Резнік, М. Левченко та В. Мельниченко, "Перспективи удосконалення системи протиповітряної оборони для протидії оперативно-тактичним ракетам", *Повітряна міць України*, т. 1, № 4, с. 18–26, черв. 2023. Доступно: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-18-26>.
6. Б. Шкурат, Д. Резнік та В. Паталаха, "Актуальні питання інтеграції існуючих та перспективних зразків озброєння в систему протиповітряної оборони",

Повітряна міць України, т. 1, № 1(2), с. 27–32, верес. 2022. Доступно: [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-1\(2\)-27-32](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-1(2)-27-32).

7. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року): навч. посіб. / М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, В.П. Бринцева. Київ : НУОУ, 2024. 96 с.

8. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року): навч. посіб. / Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, В. П. Бринцева. Київ : НУОУ, 2024. 103 с.

9. Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння : навч. посіб. / Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, О. В. Глоба, В. П. Бринцева.; за заг. ред. А. Г. Салія. К. : НУОУ, 2024. 140 с.

10. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Торопчин, І.О. Романенко, Ю.Г. Даник та ін. Київ: МО України, Харків: ХВУ, 2003. 368 с. <https://elib.nuou.org.ua/katalog/dovidnyk-pvo.html>.

11. Б. Шкурат та Д. Резнік, "Експрес-оцінювання варіантів організації взаємодії засобів протиповітряної оборони з літальними апаратами", *Повітряна міць України*, т. 1, № 6, с. 105–111, черв. 2024. Доступно: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-105-111>,

12. Конфліктологія: навч. посіб. / Л.М. Герасіна, М.П. Требін, В.Д. Воднік та інш. – Х. : Право, 2012. – 128 с.

13. Wolf conflicts: a sociological study / Ketil Skogen, Olve Krangle and Helene Figari. N.Y.; Berghahn Books, 2017. v. 1.217 p.

14. The Psychology of Conflict and Conflict Managerment in Organizations / Carsten K.W. De Dreu, Michele J Gelfand. New York, London: Lawrence Erlbaum Associates. Taylor & Francis Group, 2008. 484 p.

15. Galtung J., Peace by Peaceful Means: Peace and Conflict, Development and Civilization. 2021. 832 p. ISBN 9781292404813.

16. Fred R. David, Forest R. David, Meredith E. David: Strategic Management. Concept and Cases. 2020. 673 p. ISBN 9781292441405.

17. Kotler P., Kelle K.: Marketing Management, Development and Civilization. 1996. 292 p.

Dmytro Rieznik (PhD, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0003-3980-923x>

Valerii Patalakha (PhD, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0002-3105-4402>

Oleksandr Hloba (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-1423-8365>

Bohdan Shkurat (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF CONFLICT THEORY TO THE ORGANIZATION OF AIR DEFENSE FORCES AND ASSETS INTERACTION

The article explores the possibilities of applying conflict theory to increase the effectiveness of organizing the interaction of Ukrainian air defense forces and assets. Based on the current combat experience of the Russian-Ukrainian war, the features of the multi-level and technically heterogeneous architecture of the air defense system, as well as the challenges associated with countering various types of air attack means, including ballistic missiles and kamikaze drones, four key approaches to conflict theory are identified – game theory, structural approach, conflict management theory, and the concept of bounded rationality. Recommendations for their integration into automated air defense control systems and personnel training are determined and substantiated, which will contribute to the formation of an adaptive, conflict-resistant air defense system capable of operating effectively in the conditions of modern multi-domain warfare.

Key words: air defense, conflict theory, game theory, conflict management, structural conflict, bounded rationality, combat management, air defense system of Ukraine.

References

1. Air Defense Doctrine of the Armed Forces of Ukraine. Ministry of Defense of Ukraine, 2023.
2. S. Shevchenko, "Air Defense Coordination Challenges in Hybrid Warfare," *Journal of Military Operations*, Vol. 18, No. 4, 2023.
3. Melnyk I.V. *Vzaiemodiia syl PPO v umovakh asymetrychnykh zahroz.* – K.: NUOU, 2022. – 135 p.
4. NATO Standardization Office. "Air and Missile Defense Interoperability Framework." AJP-3.3.3, 2021.
5. B. Shkurat, O. Hloba, D. Rieznik, M. Levchenko ta V. Melnychenko, "Perspektyvy udoskonalennia systemy protypovitrianoi oborony dlia protydii operatyvno-taktychnym raketam", *Povitriana mits Ukrainy*, t. 1, № 4, p. 18–26, June. 2023.
6. B. Shkurat, D. Rieznik ta V. Patalakha, "Aktualni pytannia intehtatsii isnuuiuchykh ta perspektyvnykh zrazkiv ozbroiennia v systemu protypovitrianoi oborony", *Povitriana mits Ukrainy*, t. 1, № 1(2), p. 27–32, Sept.. 2022.
7. Zastosuvannia syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (liutyi 2022 roku – lypen 2023 roku): navch. posib. / M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, V.P. Bryntseva. Kyiv : NUOU, 2024. 96 s.
8. Zastosuvannia syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (serpen – hruden 2023 roku): navch. posib. / B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, V. P. Bryntseva. Kyiv : NUOU, 2024. 103 s.
9. Zasoby protypovitrianoi ta protyraketnoi oborony Syl oborony Ukrainy. Inozemne ozbroiennia : navch. posib. / B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, O. V. Hloba., V. P. Bryntseva.; za zah. red. A. H. Saliia. K. : NUOU, 2024. 140 s.
10. Dovidnyk z protypovitrianoi oborony/ A.Ya. Toropchyn, I.O. Romanenko, Yu.H. Danyk ta in. Kyiv: MoFD Ukrainy, Kharkiv: KhVU, 2003. 368 p.
11. B. Shkurat ta D. Rieznik, "Ekspres-otsiniuvannia variantiv orhanizatsii vzaiemodii zasobiv protypovitrianoi oborony z litalnymi aparatamy", *Povitriana mits Ukrainy*, t. 1, № 6, p. 105–111, July. 2024.
12. Konfliktolohiia: navch. posib. / L.M. Herasina, M.P. Trebin, V.D. Vodnik ta insh. – Kh. : Pravo, 2012. – 128 P.
13. Wolf conflicts: a sociological study / Ketil Skogen, Olve Krange and Helene Figari. N.Y.; Berghahn Books, 2017. v. 1.217 p.
14. The Psychology of Conflict and Conflict Managerment in Organizations / Carsten K.W. De Dreu, Michele J Gelfand. New York, London: Lawrence Erlbaum Associates. Taylor & Francis Group, 2008. 484 p.
15. Galtung J., Peace by Peaceful Means: Peace and Conflict, Development and Civilization. 2021. 832 p. ISBN 9781292404813.
16. Fred R. David, Forest R. David, Meredith E. David: Strategic Management. Concept and Cases. 2020. 673 p. ISBN 9781292441405.
17. Kotler P., Kelle K.: Marketing Management, Development and Civilization. 1996. 292 p.

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-64-70

УДК 620.91:621.311.25:355.45

¹Курочкін Валерій Вікторович
<https://orcid.org/0009-0005-7536-4399>

²Іванов Василь Іванович
<https://orcid.org/0000-0002-1963-1991>

²Целіщев Юрій Павлович (кандидат технічних наук, доцент)
<https://orcid.org/0000-0002-6308-4024>

¹Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна

²Національний університет оборони України, Київ, Україна

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В КОНТЕКСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ЧАСТИНАХ ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

З початком повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну перед Повітряними Силами Збройних Сил України постали критичні виклики в електропостачанні озброєння та військової техніки, спричинені атаками на енергетичну інфраструктуру.

В статті досліджується потенціал розвитку та впровадження альтернативних або відновлюваних джерел енергії. Розглянуті основні напрямки освоєння відновлювальних джерел енергії в Україні, а саме вітрову, сонячну, геотермальну енергію, енергію малих річок та біомаси. Ці джерела мають значний технічно-досяжний електроенергетичний потенціал. Зазначено переваги та недоліки кожного виду відновлювальних джерел енергії, такі як невичерпність та екологічність сонячної енергії, відсутність витрат на паливо, можливість використання відходів для біогазових установок та стабільність мікро гідроелектростанцій. Водночас враховано такі недоліки, як низька густина потужності, залежність від погодних умов, високі капіталовкладення та потенційний вплив на навколишнє середовище.

Мета статті – на основі аналізу альтернативних джерел електричної енергії визначити актуальність їх використання для частин Повітряних Сил Збройних Сил України в польових та стаціонарних умовах в якості як резервних джерел живлення, так і основних.

За результатами аналізу альтернативних джерел електричної енергії запропоновано їх використання для військових частин Повітряних Сил Збройних Сил України, як резервні джерела живлення, що доповнюють традиційні, через їхню залежність від зовнішніх умов.

Ключові слова: альтернативні джерела електричної енергії, відновлювальні джерела електричної енергії, електропостачання, енергоозброєність.

Вступ

Від початку повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну електропостачання озброєння та військової техніки (ОВТ) в Збройних Силах України стоїть перед низкою критичних викликів, що зумовлюють нагальну потребу в розвитку та впровадженні альтернативних, або відновлюваних, джерел енергії (ВДЕ). Це насамперед пов'язано з постійними атаками ворога на об'єкти енергетики України, що вплинуло на стабільність і якість електропостачання від проммереж об'єктів Сил оборони України. Крім того, зростання кількості електроспоживачів призводять до виснаження резервів наявних систем живлення.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження можливостей використання альтернативних джерел електричної енергії (АДЕЕ) для енергозабезпечення об'єктів Повітряних Сил Збройних Сил України. Основними напрямками розвитку АДЕЕ в Україні є сонячна, вітрова,

геотермальна енергетика, мікро гідроелектростанції, а також біоенергетика – зокрема, використання біомаси.

До ключових переваг ВДЕ належать їх невичерпність, екологічність, а також потенційна автономність, що надзвичайно важливо в умовах агресії російської федерації. Основними електротехнічними характеристиками, які визначають якість виробленої енергії, є потужність, напруга та частота. За цими параметрами електроенергія з ВДЕ відповідає державним стандартам. У той же час, технічні характеристики окремих типів установок суттєво відрізняються між собою залежно від конструкції та принципу дії, що слід враховувати при їх інтеграції в існуючу енергосистему військових об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що сучасні концепції розвитку військової електроенергетики спрямовані на створення нових, більш ефективних засобів електропостачання, що відповідають тенденціям функціонування військових

частин (підрозділів).

Тенденції розвитку ОВТ Повітряних Сил Збройних Сил України передбачають підвищення їхньої енергоозброєності, а окремі військові об'єкти потребують підвищення надійності електропостачання та незалежності від зовнішніх джерел [1]. Разом з тим, незважаючи на розгляд загальних вимог до автономних джерел енергії в [2] висвітлено питання застосування саме мобільних альтернативних джерел живлення підрозділами поза пунктами постійної дислокації.

Частина досліджень [3], присвячена аналізу досвіду провідних армій світу, зокрема США, Ізраїлю та ФРН, у впровадженні АДЕЕ на основі фотоелектричних перетворювачів. Проте, як зазначається у [4], інформація про розробку та випробування таких систем є обмеженою і переважно базується на даних з виставок та інтернет-публікацій, оскільки ці проєкти перебувають на початкових етапах реалізації. Це свідчить про необхідність подальших досліджень для адаптації та прийняття на озброєння подібних систем у Збройних Силах України.

Окремий напрямок досліджень [2] стосується технічних та економічних аспектів застосування АДЕЕ безпосередньо в умовах України. Науковці аналізують вітровий та сонячний потенціал різних регіонів країни та пропонують конкретні рішення, такі як мобільні сонячні електростанції розробки Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. Водночас автори наголошують, що наявні АДЕЕ, через залежність їхньої потужності від умов навколишнього середовища та складності дотримання вимог живучості та прихованості, не можуть вважатися основними джерелами для комплексів озброєння.

До того ж, безперерйність постачання електричної енергії на об'єкти критичної інфраструктури військового призначення, такі як бази, склади, арсенали зберігання засобів ураження, ремонтні підприємства (підрозділи) тощо має критично важливе значення для підтримання їх живучості, бойової готовності та забезпечення захисту від виникнення надзвичайних ситуацій [5-9].

Таким чином, незважаючи на значний інтерес до теми, залишається актуальною проблема розробки пропозицій щодо можливостей застосування АДЕЕ для підвищення надійності електропостачання та енергетичної незалежності військових.

Матеріали та методи

Дослідження АДЕЕ щодо можливості їх використання в польових та стаціонарних умовах як в якості основних, так і резервних джерел живлення в частинах Повітряних Сил Збройних Сил України проведено методами аналізу та порівняння.

Результати

Станом на 2024 рік річний технічно-досяжний електроенергетичний потенціал ВДЕ в Україні становив:

енергія Сонця: 82768 МВт встановленої потужності, 99323 млн кВт·год/рік середньорічного виробітку;

енергія вітру (з урахуванням територіальних вод та внутрішніх водойм): 688000 МВт встановленої потужності, 2173770 млн кВт·год/рік середньорічного виробітку;

енергія малих річок: 376 МВт встановленої потужності, 1272 млн кВт·год/рік середньорічного

виробітку;

Геотермальна енергія: 10810 МВт встановленої потужності, 80494 млн кВт·год/рік середньорічного виробітку;

Енергія біомаси: 92078 МВт встановленої потужності, 362161 млн кВт·год/рік середньорічного виробітку.

Всього: 874 тис. МВт встановленої потужності, 2717 млрд кВт·год/рік середньорічного виробітку [10].

Розглянемо детальніше кожен вид АДЕЕ.

Сонячна енергія є одним із найдоступніших і практично невичерпних відновлюваних енергетичних ресурсів, ефективне використання якого можливе у більшості регіонів світу. Завдяки різним технологіям її можна безпосередньо перетворювати на електричну енергію – за допомогою фотоелектричних установок, або на теплову енергію – за допомогою сонячних колекторів. Також можливе комбіноване виробництво електричної та теплової енергії в єдиній системі.

Сьогодні розрізняють два основних методи перетворення сонячної енергії:

фототермічний (тепловий);

фотоелектричний (електричний).

У фототермічному методі, який вважається технологічно простішим, теплоносієм (найчастіше вода або антифриз) нагрівається в сонячному колекторі до заданої температури, після чого використовується для опалення або гарячого водопостачання.

У фотоелектричному методі сонячне випромінювання перетворюється на електроенергію за допомогою фотоелементів, об'єднаних у фотоелектричні панелі. Цей принцип широко застосовується для живлення окремих об'єктів або в складі автономних і гібридних систем енергопостачання.

Потужність сонячної панелі вимірюється за формулою

$$P = EA\eta \quad (1)$$

де P – вихідна потужність сонячної панелі (Вт);

E – інтенсивність сонячного випромінювання (інсоляція), що падає на поверхню панелі (Вт/м²);

A – площа поверхні сонячної панелі (м²);

η – коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричних елементів (зазвичай 15-22%).

Зазначена формула прямо пов'язана з недоліками сонячної енергетики, а саме низькою питомою потужністю на одиницю площі та залежністю від погодних умов (змінна інтенсивність випромінювання). Тепер стає зрозуміло, що для досягнення значної потужності потрібні великі площі, що є критичним фактором для військових об'єктів з огляду на вимоги до скритності та живучості.

Переваги сонячної енергетики:

практично невичерпне джерело енергії;
екологічна чистота (відсутність викидів шкідливих речовин);
відсутність витрат на паливо;
можливість автономного застосування в польових умовах.

Недоліки сонячної енергетики:
низька питома потужність (на одиницю площі);
залежність від погодних умов і зміни інтенсивності сонячного випромінювання;
високі витрати на накопичення та зберігання енергії (акумулятори, буферні ємності);
значні капітальні витрати на створення інфраструктури.

Вітрова турбіна (ВТУ) — це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення кінетичної енергії повітряних мас у механічну, а далі — в електричну енергію. Вона є основним елементом вітрової електростанції та належить до відновлюваних джерел енергії, оскільки вітер як природне явище відновлюється без людського втручання.

Існуючі ВТУ класифікуються за конструктивними ознаками, зокрема за положенням вітрового колеса у повітряному потоці. Розглянемо їх основні види.

Крильчаті ВТУ, до цього класу належать турбіни, в яких вісь обертання вітрового колеса розташована паралельно до напрямку вітру. Площина обертання вітрового колеса — вертикальна, тобто перпендикулярна до вітрового потоку. Такі турбіни мають високу ефективність за умов постійного напрямку і швидкості вітру та здебільшого використовуються в промислових установках.

ВТУ з вертикальною віссю обертання. У цьому класі турбін вісь обертання розташована вертикально, а самі турбіни менш чутливі до змін напрямку вітру. До підгруп цього класу належать:

карусельні ВТУ, в яких лопаті можуть бути частково захищені екраном або орієнтовані ребром проти вітру;

ВТУ з ротором Савоніуса, що використовують переважно силу лобового опору для обертання.

Вертикальні конструкції зручні для встановлення у міських умовах та на дахах будівель, однак мають нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з крилатими турбінами.

Барабанні ВТУ. Ці турбіни функціонують за принципом водяного млина: вісь обертання горизонтальна та перпендикулярна до напрямку вітру. Вони відзначаються простотою конструкції, але поступаються іншим класам за енергоефективністю. Барабанні турбіни застосовуються переважно в малопотужних установках.

В [14-19] наведені комплексні технічні вимоги та аспекти безпеки вітроенергетичних установок. Критично важливими питаннями є наявність незалежних систем керування та захисту, що забезпечують безпечне функціонування та автоматичне зупинення установки в аварійних ситуаціях.

Серед основних переваг використання вітрових турбін варто зазначити:

відсутність шкідливих викидів та забруднень;
відсутність витрат на паливо;
низький рівень експлуатаційних витрат після встановлення обладнання.

Фундаментальною для розуміння потенціалу вітроенергетики є формула потужності ВТУ

$$P = 0,5\rho AV^3 C_p \quad (2)$$

де P — потужність, що генерується турбіною (Вт);

ρ — густина повітря (приблизно 1.225 кг/м³ на рівні моря);

A — площа, яку охоплюють лопаті ротора (м²), розраховується як $A = \pi R^2$, де R — радіус лопаті;

V — швидкість вітру (м/с);

коефіцієнт потужності (або коефіцієнт використання енергії вітру),

C_p — безрозмірна величина, що показує ефективність турбіни (теоретична межа становить 0,593 — межа Беца).

Ця формула демонструє ключову залежність потужності від швидкості вітру (у кубічній залежності), що підкреслює один із головних недоліків вітроенергетики — нестабільність генерації. Також вона демонструє, чому для військових об'єктів важливий ретельний аналіз вітрового потенціалу конкретної місцевості

Отже галузь вітроенергетики має низку недоліків:

низька питома потужність;
нестабільність генерації через змінну швидкість вітру;

необхідність дорогих систем акумулювання енергії;

прояв екрануючого ефекту, що впливає на рух повітря біля земної поверхні;

порушення режиму випаровування вологі;
ризиків для птахів, особливо перелітних, та комах;

можливі локальні кліматичні зміни;

шумовий вплив та низькочастотні коливання;

візуальне навантаження на ландшафт, що викликає відторгнення у мешканців;

електромагнітні перешкоди для радіо- і телесигналів;

відчуження сільськогосподарських земель.

Енергія біомаси є найдавнішим джерелом енергії, що використовується людиною. Поки промислова революція не спонукала до переходу на викопне паливо в середині 18 століття, енергія біомаси була домінуючим у світі джерелом палива. Використовувалося пряме спалювання твердої біомаси для забезпечення енергією для опалення, приготування їжі та навіть вироблення електроенергії. Найпоширенішим джерелом прямого горіння є деревина, але енергія також може генеруватися спалюванням гною тварин (гною), трав'янистої рослинної сировини (недеревного), торфу (частково розкладеної рослинної та

тваринної тканини) або переробленої біомаси тощо. [11]

З огляду на сприятливе географічне розташування, значний агропромисловий потенціал та доступність біомасової сировини, Україна має передумови для активного розвитку біоенергетики. Щорічно земна поверхня поглинає $5,2 \cdot 10^{23}$ Дж сонячної енергії. Усі створені людиною енергосистеми використовують незначну частину цієї енергії. [12]

Останнім часом в Україні починає активно застосовуватись газифікація твердого палива, зокрема деревної біомаси. Для отримання генераторного газу використовують автономні газогенераторні установки, сировиною для яких можуть бути відходи деревини, пелети, тріска тощо. [13]

Можливо відмітити наступні переваги біогазових електростанцій:

- максимальне використання відходів життєдіяльності військової частини;
- відносно швидка окупність капітальних вкладень.

Одним із невирішених питань технології газифікації є проблема утилізації конденсату, який містить шкідливі для оточуючого середовища органічні речовини. Такий конденсат потрібно очищувати перед його викидом у водоймища або водотоки. Зазвичай промислові стоки спочатку очищуються фізико-хімічними, а потім, за необхідності, й біологічними способами. Це потребує значних капітальних вкладень, пов'язаних із будівництвом та функціонуванням очисних споруд і не забезпечує необхідного ступеню очистки. [13]

Як показують розрахунки, в Україні є велика кількість річок з витратою води $2 \text{ м}^3/\text{с}$, що є достатнім для роботи турбін, на яких можна встановити каскад мікро гідроелектростанцій.

Мікро гідроелектростанції (мікро ГЕС) могли б забезпечувати електроенергією військові частини, що знаходяться в гірських місцевостях, і інші видалені точкові об'єкти.

Впровадження енергозберігаючих заходів може дозволити скоротити на 25-80% споживання електричної енергії на існуючих інженерних військових об'єктів, що розташовані в гірських місцевостях України та поліпшити там екологічну обстановку.

Виробництво мікро ГЕС в Україні було налагоджено на Харківському підприємстві "Турбоатом".

Потужність мікро ГЕС визначається за формулою

$$P = \eta \rho g Q H \quad (3)$$

- де P – потужність гідроелектростанції (Вт);
- η – ККД турбіни та генератора (зазвичай 0.7-0.9);
- ρ – густина води (приблизно $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$);
- g – прискорення вільного падіння ($\approx 9.81 \text{ м}/\text{с}^2$);
- Q – витрата води через турбіну ($\text{м}^3/\text{с}$);

H – напір (різниця висот між рівнями води, м).

Стає зрозумілим, що потужність мікро ГЕС залежить від відносно стабільних параметрів (витрати води та напору), що в свою чергу підтверджує стійку подачу електроенергії та практичну відсутність залежності від погоди та часу доби.

Переваги використання мікро ГЕС:

- відсутнє порушення природного ландшафту та навколишнього середовища в процесі будівництва та на етапі експлуатації;

- практично відсутня залежність від погодних умов та часу доби;

- забезпечується стійка подача електроенергії споживачеві в будь-яку пору року. [10]

Недоліки:

- в багатьох випадках віддаленість річок від зони розташування військових об'єктів;

- зменшується проточність та турбулентність води;

- скорочується водообмін;

- створення застійних зон;

- гідрохімічний склад води змінюється та утворюються сприятливі умови для зростання кількості водоростей;

- зміна циркуляції вод, поява регіональних і біологічних аномалій під впливом гідродинамічних і теплових збурень [10].

Геотермальна енергія – це теплова енергія, що виділяється в результаті природних процесів у надрах Землі. Використовується для опалення, гарячого водопостачання та виробництва електроенергії, часто за допомогою бінарного органічного циклу Ренкіна або циклу Каліні.

В Україні існують значні геотермальні ресурси, зокрема у Закарпатському прогині та вздовж узбережжя Чорного моря. Інститут відновлювальної енергетики Національної академії наук України створив електронну базу геотермальних об'єктів України, що налічує понад 600 вироблених або непродуктивних газових та нафтових свердловин у 12 областях, які можуть бути використані в геотермальній енергетиці.

На відміну від інших ВДЕ, темпи нарощування виробничих потужностей геотермальної енергетики в Україні значно повільніші, що пов'язано з додатковими початковими капітальними витратами [10].

Обговорення

В умовах розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України спостерігається тенденція до нарощування енергетичного потенціалу та впровадження новітніх систем електропостачання. Забезпечення надійного постачання електроенергії для стаціонарних та польових об'єктів Повітряних Сил Збройних Сил України, зокрема арсеналів, баз, складів, пунктів управління є важливим фактором підтримання бойової готовності військ.

Військові об'єкти висувають особливі вимоги до енергозабезпечення, серед яких ключовими є: висока живучість систем;

захищеність від завад;
підвищена скритність.

Досягнення необхідного рівня цих характеристик вимагає впровадження комплексу спеціальних технічних і тактичних заходів.

Незважаючи на зацікавленість у впровадженні АДЄЕ, таких як вітрові чи сонячні електростанції, вони не можуть розглядатися як основні або гарантовані джерела електропостачання військових об'єктів через їх залежність від природних умов. Зокрема, змінна інтенсивність вітру або обмеження інсоляції у певних регіонах унеможливають стабільне та безперервне енергозабезпечення в умовах бойових дій.

Висновки

Перехід до децентралізованих відновлюваних джерел енергії є не просто бажаним екологічним чи економічним кроком, він забезпечить стійкість до атак, дозволить зменшити зовнішні залежності та значно підвищить ефективність та живучість частин та підрозділів Повітряних Сил Збройних Сил України. Оскільки багато поточних ініціатив України у сфері АДЄЕ реалізуються на цивільній критичній інфраструктурі, розробка пропозицій щодо застосування АДЄЕ на об'єктах Повітряних Сил Збройних Сил України є актуальною.

Найбільш доцільними для застосування на об'єктах Повітряних Сил Збройних Сил України АДЄЕ є сонячні та вітрові. При цьому слід мати на увазі виконання вимог живучості та скритності, а також особливості регіонального розташування об'єктів енергопостачання.

Отже, аналізуючи різноманітні існуючі моделі функціонування систем експлуатації, відновлення, зберігання ОВТ [20-22] виникає необхідність щодо інтегрування в них підсистем, які відповідають за безперебійність їх функціонування в різноманітних складних, як природних, техногенних, так і бойових умовах. Це дозволить з більшою ефективністю виконувати функціональні завдання, що, в цілому, призведе до підвищення їх ефективності. Зазначене може визначати подальший розвиток цього напрямку.

Таким чином, на основі проведення аналізу альтернативних джерел електричної енергії в контексті їх використання в частинах Повітряних Сил Збройних Сил України доцільно провести дослідження використання сонячних та вітрових електростанцій на аеродромах авіації, частинах та підрозділах зенітних ракетних військ та радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України.

Список використаних джерел

1. Г. І. Лагутін, А. О. Столяров, П. В. Тимошенко, О. О. Юр'єв “Способи застосування альтернативних джерел електричної енергії для електропостачання військових частин (підрозділів)”, Збірник наукових праць ХНУПС № 2(64), с. 120–127, 2020, DOI: 10.30748/zhups.2020.64.17. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/article/view/281>.
2. О. О. Казіміров, Р. О. Гончар, К. В. Власов, І. Л. Костенко “Аналіз існуючих систем, призначених для забезпечення живлення індивідуальних технічних

засобів військовослужбовця в польових умовах”, Збірник наукових праць ХНУПС № 2 (72), с. 57–64, 2022, DOI: 10.30748/zhups.2022.72.09. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/article/view/1194>.

3. Д. М. Шателюк Розробка мобільної сонячної електростанції для потреб Збройних Сил України в польових умовах, кваліфікаційна робота, Поліський Національний університет, Житомир, 2020. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/11267>.

4. С. А. Степенко, К. В. Башинський “Оцінка можливості використання альтернативних джерел енергії на основі фотоелектричних перетворювачів у Збройних Силах України”, Системи озброєння і військова техніка № 4 (48), с. 50–56, 2016. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2016_4_13.

5. О. Avramenko, V. Polischuk, M. Pidhorodetskyi, A. Salii, O. Salii, “Determination of the optimal technical servicing periodicity of samples of aerodrome construction equipment”, Strength Mater. Theory Struct., № 107, с. 265–280, жовт. 2021. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.265-280>.

6. Р. Openko, V. Bychenkov, V. Polischuk, M. Pidhorodetskyi, A. Salii та O. Salii, “Development of mathematical models of process of change of the technical condition of samples of building technique is during realization of strategy of technical exploitation according to condition”, Strength Mater. Theory Struct., № 110, с. 375–392, черв. 2023. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.375-392>.

7. Ю. Сарапін, О. Авраменко, В. Іванов та О. Федоров, “Підвищення ефективності захисту об'єктів зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження) від виникнення надзвичайних ситуацій шляхом удосконалення умов зберігання”, Повітр. міць України, т. 2, № 5, с. 51–57, груд. 2023. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-51-57>.

8. О. Авраменко, Ю. Сарапін, П. Яблонський та О. Федоров, “Визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування системи пожежної сигналізації та оповіщення на військових об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження)”, Повітр. міць України, т. 2, № 7, с. 96–105, груд. 2024. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-96-105>.

9. М. Дивізійнюк, В. Мірненко, і В. Поліщук, «Використання методів аналізу ризику стосовно терористичних загроз на об'єктах критичної інфраструктури, що охороняються», JSPSDS, вип. 12, вип. 4, с. 119-128, Сер 2022. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.4.11>.

10. А. А. Барило, М. Бенменні, Д. В. Бондаренко, М. О. Будько, В. І. Будько, П. Ф. Васько, Дідківська Г. Г., Дяченко О. С., Жовмір М. М., Зур'ян О. В., Іванченко І. В., Іванчук В. Ю., Кармазін О. А., Клюс В. П., Коханевич В. В., Коханевич В. П Відновлювані джерела енергії: Монографія. Київ, Україна, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024.

11. C. Zehnder, K. Manoylov, S. Mutiti, C. Mutiti, A. VandeVoort, D. Bennett Introduction to Environmental Science. Open Textbook Georgia College and State University, USA, 2018 14 трав. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://oer.galileo.usg.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=biology-textbooks>.

12. М. І. Федорчук, С. В. Коковіхін, С. М. Каленська, Д. Б. Рахметов, В. Г. Федорчук, І. М. Філіпова, С. Д. Рахметов, О. А. Коваленко, А. В. Дробітько, А. В. Панфілова Агротехнологічні аспекти вирощування

енергетичних культур в умовах півдня України: Навчальний посібник. Херсон, Україна, ВДНЗ “Херсонський державний аграрний університет”, 2017.

13. Г.О. Четверик “Енергоефективне перетворення рідких відходів газифікації біомаси в біогазовій установці”, дис. канд. техн. наук, НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Київ, 2018. Дата звернення: 18 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Dis-Chetveryk.pdf>.

14. Вітроенергетика. Установки електричні вітрові. Загальні технічні вимоги. ДСТУ 4037-2001. Держстандарт України, Київ, Україна, 2001.

15. Вітроенергетика. Станції електричні вітрові. Загальні технічні вимоги. ДСТУ 4051-2001. Держстандарт України, Київ, Україна, 2001.

16. Вітроенергетика. Установки електричні вітряні малої потужності. Загальні технічні вимоги. ДСТУ 4859:2007. Держспоживстандарт, Київ, Україна, 2009.

17. Системи турбогенераторні вітряні. Частина 1: Вимоги безпеки. (ІЕС61400-1:1999, ІДТ). ДСТУ ІЕС 61400-1-2001. Держспоживстандарт, Київ, Україна, 2003.

18. Системи турбогенераторні вітряні. Частина 2: Вимоги безпеки малих вітряних турбін. (ІЕС61400-2:1996, ІДТ). ДСТУ ІЕС 61400-2-2001. Держстандарт України, Київ, Україна, 2002.

19. Системи турбогенераторні вітряні. Частина 11: Методика вимірювання акустичного шуму. (ІЕС61400-1:199, ІДТ). ДСТУ ІЕС 61400-11-2001. Держспоживстандарт, Київ, Україна, 2003.

20. В. П. Диптан, П. М. Яблонський, Д. І. Дуленко, В. В. Поліщук та О. О. П’явчук, “Обґрунтування застосування дифузійно-немонотонного розподілу у якості моделі відмов авіаційних засобів ураження”, Повітр. міць України, т. 1, № 1, с. 70–72, груд. 2021. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-70-72>.

21. П. М. Яблонський, Ю. П. Целіщев, О. В. Авраменко, Ю. М. Косков, В. І. Іванов та О. О. П’явчук, “Оцінка надійності системи, що працює в двох змінних режимах використання”, Повітр. міць України, т. 1, № 1, с. 77–79, груд. 2021. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-77-79>.

22. В. Поліщук, А. Салій, Ю. Целіщев, В. Іванов та Ю. Косков, “Обґрунтування математичної моделі функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки Повітряних Сил в умовах швидкої зміни обстановки”, Повітр. міць України, т. 1, № 1(2), с. 61–64, верес. 2022. Дата звернення: 16 вер. 2025. [Онлайн]. Доступно: [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-1\(2\)-61-64](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-1(2)-61-64).

¹Valerii Kurochkin

<https://orcid.org/0009-0005-7536-4399>

²Vasyl Ivanov

<https://orcid.org/0000-0002-1963-1991>

²Yurii Tselitshev (Candidate of Technical Sciences, Associated Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-6308-4024>

¹State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Cherkasy, Ukraine

²The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ALTERNATIVE SOURCES OF ELECTRIC ENERGY IN THE CONTEXT OF THEIR USE IN THE UNITS OF THE AIR FORCE OF UKRAINE

Since the beginning of the invasion of Ukraine by the Russian Federation, the Air Force of Ukraine has faced critical challenges in the power supply of weapons and military equipment caused by attacks on energy infrastructure.

The article explores the potential for the development and implementation of alternative or renewable energy sources. The main directions of development of renewable energy sources in Ukraine are considered, namely wind, solar, geothermal, small river and biomass energy. These sources have significant technically achievable electricity potential, with the greatest potential in wind and solar energy. The advantages and disadvantages of each type of renewable energy source, such as the inexhaustibility and environmental friendliness of solar energy, the absence of fuel costs, the possibility of using waste for biogas plants, and the stability of micro-hydroelectric power plants, are noted. At the same time, disadvantages such as low power density, dependence on weather conditions, high capital investment, and potential environmental impact are taken into account.

The purpose of the article is to determine, on the basis of the analysis of alternative sources of electric energy, the relevance of their use for units of the Air Force of Ukraine in the field and stationary conditions as backup power sources and as the main ones.

Based on the results of the analysis of alternative sources of electric energy, it is proposed to use them for military units of the Air Force of Ukraine as backup power sources that complement the traditional ones due to their dependence on external conditions.

Keywords: alternative sources of electric energy, renewable sources of electric energy, power supply, energy intensit

References

1. Gh. I. Laghutin, A.O. Stoljarov, P.V. Tymoshenko, O.O. Jur'jev "Sposoby zastosuvannya al'ternatyvnykh dzherel elektrychnoi energiji dlja elektropostachannya vijskovykh chastyn (pidrozdiliv)", Zbirnyk naukovykh pracj KhNUPS # 2(64), s. 120–127, 2020, DOI: 10.30748/zhups.2020.64.17. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/article/view/281>.
2. O. O. Kazimirov, R. O. Ghonchar, K. V. Vlasov, I. L. Kostenko "Analiz isnujuchykh system, pryznachenykh dlja zabezpechennja zhyvlennja indyvidualnykh tekhnichnykh zasobiv vijskovosluzhbovcja v poljovykh umovakh", Zbirnyk naukovykh pracj KhNUPS # 2 (72), s. 57–64, 2022, DOI: 10.30748/zhups.2022.72.09. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/zhups/article/view/1194>.
3. D. M. Shateljuk Rozrobka mobiljnoji sonjachnoji elektrostanciji dlja potreby Zbrojnykh Syl Ukrainy v poljovykh umovakh, kvalifikacijna robota, Polisskij Nacionalnij universytet, Zhytomyr, 2020. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/11267>.
4. S. A. Stepenko, K. V. Bashynskij "Ocinka mozhlivosti vykorystannja al'ternatyvnykh dzherel energijina osnovi fotoelektrychnykh peretvorjuvachiv u Zbrojnykh Sylakh Ukrainy", Systemy ozbrojennja i vijskova tekhnika # 4 (48), s. 50–56, 2016. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2016_4_13.
5. O. Avramenko, V. Polischuk, M. Pidhorodetskyi, A. Salii, O. Salii, "Determination of the optimal technical servicing periodicity of samples of aerodrome construction equipment", Strength Mater. Theory Struct., № 107, c. 265–280., 2021. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.265-280>.
6. P. Openko, V. Bychenkov, V. Polischuk, M. Pidhorodetskyi, A. Salii ta O. Salii, "Development of mathematical models of process of change of the technical condition of samples of building technique is during realization of strategy of technical exploitation according to condition", Strength Mater. Theory Struct., № 110, c. 375–392, 2023. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.375-392>.
7. Ju. Sarapin, O. Avramenko, V. Ivanov ta O. Fedorov, "Pidvyshhennja efektyvnosti zakhystu ob'ektiv zberighannja bojeprypasyv (aviacijnykh zasobiv urazhennja) vid vynyknennja nadzvychajnykh situacij shljakom udoskonalennja umov zberighannja", Povitr. Micj Ukrainy, t. 2, # 5, s. 51–57., 2023. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-51-57>.
8. O. Avramenko, Ju. Sarapin, P. Jablonskij ta O. Fedorov, "Vyznachennja optymaljnoji periodychnosti tekhnichnogho obslughovuvannja systemy pozhezhnoji syghnalizaciji ta opovishhuvannja na vijskovykh ob'ektakh zberighannja bojeprypasyv (aviacijnykh zasobiv urazhennja)", Povitr. Micj Ukrainy, t. 2, # 7, s. 96–105, 2024. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-96-105>.
9. M. Dyvizinuk, V. Mirnenko, i V. Polishhuk, «Vykorystannja metodiv analizu ryzkyu stosovno terorystychnykh zagroz na ob'ektakh krytychnoji infrastruktury, shho okhoronjajutsja», JSPSDS, vyp. 12, vyp. 4, s. 119–128, 2022 Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.4.11>.
10. A. A. Barylo, M. Benmenni, D. V. Bondarenko, M.O. Budjko, V.I. Budjko, P.F. Vasjko, Didkivjska Gh. Gh., Djjachenko O. S., Zhovmir M. M., Zur'jan O. V., Ivanchenko I. V., Ivanchuk V. Ju., Karmazin O. A., Kljus V. P., Kokhanjevych V. V., Kokhanjevych V. P Vidnovljuvani dzherela energiji: Monohrafija. Kyiv, Ukraine, Instytut vidnovljuvanoi energhetiky NAN Ukrainy, 2024.
11. C. Zehnder, K. Manoylov, S. Mutiti, C. Mutiti, A. VandeVoort, D. Bennett Introduction to Environmental Science. Open Textbook Georgia College and State University, USA, 2018 14 trav. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://oer.galileo.usg.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=biology-textbooks/>
12. M. I. Fedorchuk, S.V. Kokovikhin, S.M. Kalensjka, D.B. Rakhmetov, V.Gh. Fedorchuk, I.M. Filipova, S.D. Rakhmetov, O.A. Kovalenko, A.V. Drobitjko, A.V. Panfilova Aghrotekhnologichni aspekty vyroshhuvannja energhetichnykh kul'tur v umovakh pivdnja Ukrainy: Navchaljnyj posibnyk. Kherson, Ukraine, VDNZ "Khersonskij derzhavnyj aghrarnyj universytet", 2017.
13. Gh.O. Chetveryk "Energhoefektyvne peretvorennja ridkykh vidkhodiv ghazyfikaciji biomasy v bioghazovij ustanovci", dys. kand. tekhn. nauk, NAN Ukrainy, Instytut vidnovljuvanoi energhetiky, Kyiv, 2018. Date of application: 18 sep. 2025. [Online]. Available: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Dis-Chetveryk-.pdf>.
14. Vitroenerghetyka. Ustanovky elektrychni vitrovi. Zaghaljni tekhnichni vymoghy. DSTU 4037-2001. Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, Ukraine, 2001.
15. Vitroenerghetyka. Stanciji elektrychni vitrovi. Zaghaljni tekhnichni vymoghy. DSTU 4051-2001. Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, Ukraine, 2001.
16. Vitroenerghetyka. Ustanovky elektrychni vitrjani maloji potuzhnosti. Zaghaljni tekhnichni vymoghy. DSTU 4859:2007. Derzhspozhyvstandart, Kyiv, Ukraine, 2009.
17. Systemy turbogeneratoromi vitrjani. Chastyna 1: Vymoghy bezpeky. (IES61400-1:1999, IDT). DSTU IES 61400-1-2001. Derzhspozhyvstandart, Kyiv, Ukraine, 2003.
18. Systemy turbogeneratoromi vitrjani. Chastyna 2: Vymoghy bezpechnosti malykh vitrjanykh turbin. (IES61400-2:1996, IDT). DSTU IES 61400-2-2001. Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, Ukraine, 2002.
19. Systemy turbogeneratoromi vitrjani. Chastyna 11: Metodyka vymirjuvannja akustychnogho shumy. (IES61400-1:199, IDT). DSTU IES 61400-11-2001. Derzhspozhyvstandart, Kyiv, Ukraine, 2003.
20. V. P. Dyptan, P. M. Jablonskij, D. I. Dulenko, V. V. Polishhuk ta O. O. P'javchuk, "Obgruntuuvannja zastosuvannja dyfuzijnno-nemonotonnogho rozpodilu u yakosti modeli vidmov aviacijnykh zasobiv urazhennja", Povitr. Micj Ukrainy, t. 1, # 1, s. 70–72, 2021. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-70-72>.
21. P. M. Jablonskij, Ju. P. Celishhev, O. V. Avramenko, Ju. M. Koskov, V. I. Ivanov ta O. O. P'javchuk, "Ocinka nadijnosti systemy, shho pracjuje v dvokh zminnykh rezhymakh vykorystannja", Povitr. Micj Ukrainy, t. 1, # 1, s. 77–79., 2021. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-77-79>.
22. V. Polishhuk, A. Salij, Ju. Celishhev, V. Ivanov ta Ju. Koskov, "Obghruntuuvannja matematychnoji modeli funkcionuvannja systemy vidnovlennja avtomobiljnoji i specialjnoji tekhniki Povitrjanykh Syl v umovakh shvydkoji zminy obstanovky", Povitr. Micj Ukrainy, t. 1, # 1(2), s. 61–64, 2022. Date of application: 16 sep. 2025. [Online]. Available: [https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-1\(2\)-61-64](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2022-1-1(2)-61-64).

Попов Сергій Едуардович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-7410-1267>

Юфа Євген Агашович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-6362-5986>

Бондар Валерій Вікторович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0001-8843-680X>

Єлізаров Борис Костянтинівич

<https://orcid.org/0009-0002-2564-2491>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО ОБСЯГУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЧАСУ НА ЙОГО ПРОВЕДЕННЯ ПІД ЧАС БОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВІЙСЬК

Сучасні умови збройного протиборства у повітряному просторі, тривалість і напруженість бойових дій, створюють передумови до зростання кількості відмов радіоелектронної техніки внаслідок експлуатаційних та бойових пошкоджень. Зменшення кількості відмов радіоелектронної техніки з експлуатаційних причин під час бойового застосування можна вирішити за рахунок своєчасного планування та якісного проведення її технічного обслуговування.

У статті, з метою підвищення інформативності оцінювання можливостей системи експлуатації і ремонту (відновлення) озброєння та військової техніки радіотехнічних військ щодо виконання покладених на неї завдань, обґрунтовано підходи щодо визначення необхідного обсягу технічного обслуговування радіоелектронної техніки радіотехнічних військ в умовах обмеженого часу на його проведення. Дослідження проведено з використанням відомих наукових методів, зокрема, системного аналізу, теорії ймовірностей та систем масового обслуговування, які дозволили з достатньою повнотою і точністю описати основні процеси, що циркулюють в системі відновлення та ремонту озброєння та військової техніки радіотехнічних військ під час бойового застосування. Запропоновані підходи доцільно використовувати у ході подальших наукових досліджень з питань підвищення ефективності експлуатації і ремонту (відновлення) озброєння та військової техніки радіотехнічних військ та ефективності їх бойового застосування. Матеріали статті також можуть бути корисними для фахівців оперативної і тактичної ланок управління, які займаються питаннями удосконалення функціонування систем експлуатації і ремонту (відновлення) озброєння та військової техніки родів військ Повітряних Сил з метою підтримання їх у постійній готовності до використання за призначенням.

Ключові слова: радіотехнічні війська, експлуатація, відновлення, ремонт, технічне обслуговування, радіоелектронна техніка.

Вступ

За останні роки та з початком розв'язання і ведення повномасштабної війни російської федерації (рф) проти України, відбулися значні зміни у підходах щодо застосування сил оборони держави, формах і способах ведення операцій (бойових дій) та їх всебічного забезпечення [1, 2]. Досвід ведення російсько-української війни [3] показав, що радіотехнічні війська (РТВ) Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил (ЗС) України залишаються основним джерелом інформації про повітряну обстановку і складають основу системи розвідки та попередження про повітряного противника [4]. Під час бойового застосування на РТВ покладається ряд завдань основними з яких є [5]: безперервне ведення радіолокаційної розвідки (РЛР); своєчасне оповіщення військ та об'єктів

про початок повітряного нападу; видача радіолокаційної інформації на вищі, взаємодіючі та забезпечувані пункти управління для ведення ними бойових дій та бойового управління підпорядкованими силами і засобами.

Своєчасне виконання покладених на РТВ завдань напряму залежить від технічної готовності озброєння та військової техніки (ОВТ) РТВ до використання за призначенням. Тому, актуальним залишається питання щодо реалізації принципів бойового застосування РТВ, одними з основних яких є [5]: постійна бойова готовність; повне використання бойових можливостей військових частин (підрозділів) РТВ; підтримання ОВТ РТВ у постійній готовності до використання за призначенням та своєчасний її ремонт (відновлення) у разі відмов чи пошкоджень.

Реалізувати зазначені принципи можливо лише за умов ефективного виконання усіх функцій логістичного забезпечення (ЛЗ) РТВ, зокрема, забезпечення ОВТ, технічного обслуговування (ТО), ремонту (відновлення) ОВТ та їх використання за призначенням [6].

Зазначені заходи будуть відбуватися на всіх етапах (життєвого циклу) експлуатації (використання за призначенням) радіоелектронної техніки (РЕТ), яка є основним видом озброєння РТВ. Основними складовими цього циклу у ході підготовки та бойового застосування військ є заходи з організації і проведення ТО та ремонту (відновлення) РЕТ РТВ [7].

До складу РЕТ РТВ входять різні за функціональним призначенням засоби радіолокації (ЗРЛ) (радіолокаційні станції (РЛС), рухомі радіовисотоміри (РРВ), наземні радіолокаційні запитувачі (НРЗ)), засоби автоматизації (ЗА) та спеціальні засоби [5].

Під час ведення бойових дій (бойового застосування) з метою підтримання РЕТ РТВ у працездатному стані організовуються і проводяться різні види ТО, зокрема [7]:

ТО-1 – на зразках РЕТ, які не плануються до використання за призначенням під час бойового застосування протягом визначеного часу без зняття їх з бойового чергування за рішенням начальника РТВ ПвК;

ТО-2 – на зразках РЕТ, як правило, у перервах між використанням за призначенням, цілодобово, за рішенням командувача ПвК, з термінами приведення їх у готовність до використання за призначенням не більше 30 хв;

технічний огляд – на зразках РЕТ ручним або автоматизованим способом, з метою спостереження за їх технічним станом безпосередньо перед використанням за призначенням [8].

Отже, питання щодо підвищення ефективності проведення ТО РЕТ в умовах обмеженого часу на його проведення під час бойового застосування РТВ, на сьогоднішній день залишається актуальним і потребує подальшого дослідження.

Матеріали та методи

Для оцінювання ефективності функціонування будь-якої складної системи військового призначення, у т. ч. і системи ТО РЕТ РТВ, як складової системи експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ РТВ, необхідно мати відповідний науково-методичний апарат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій стосовно підходів до оцінювання ефективності функціонування різних за цільовим призначенням систем експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ ПС ЗС України [10–17] показав, що вони не у повному обсязі можуть бути застосовані для оцінювання ефективності функціонування системи ТО ОВТ РТВ через неврахування особливостей підготовки різних за функціональним призначенням зразків РЕТ РТВ до використання за призначенням, їх експлуатації, ремонту (відновлення) у разі відмов чи пошкоджень в

умовах обмеженого часу на їх проведення.

Отже, метою статі є обґрунтування підходів до визначення необхідного обсягу ТО РЕТ РТВ, в залежності від наявного часу на його проведення за рахунок врахування особливостей організації і проведення різних видів ТО на різних за функціональним призначенням зразках РЕТ РТВ під час бойового застосування військ.

Дослідження проведено з використанням відомих наукових методів, зокрема, системного аналізу, теорії ймовірностей та систем масового обслуговування, які дозволили з достатньою повнотою і точністю описати основні процеси, що циркулюють в системі експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ РТВ під час бойового застосування.

Результати

Підготовка зразка РЕТ до використання за призначенням, як складова його життєвого циклу (експлуатації), має на меті попередження несправностей і відмов в процесі його експлуатації [7]. Ця підготовка включає комплекс спланованих операцій з ТО зразка РЕТ, які проводяться перед його використанням за призначенням.

Оцінювання ефективності проведеного ТО зразка РЕТ у визначеному обсязі робіт можна здійснити за ймовірністю того, що цей зразок до моменту його використання за призначенням буде повністю справним і працюватиме безвідмовно протягом заданого часу (ймовірність безвідмовної роботи зразка РЕТ ($P_{\text{над}}$)) [7, 9].

Строки і обсяг ТО повинні визначатися технічним станом зразка РЕТ і забезпечувати його працездатний стан. При збільшенні строків і обсягу ТО, що можливо лише за умови збільшення часу на його проведення, $P_{\text{над}}$ збільшується. Якщо час на підготовку зразка РЕТ до використання за призначенням обмежений, то $P_{\text{над}}$ знижується, тобто зразок РЕТ може опинитися невідповідним до використання за призначенням, що рівнозначно зриву виконання бойового завдання бойовою обслугою. Тому, планування і своєчасне проведення ТО зразка РЕТ, за будь-яких умов, повинно забезпечувати підвищення ефективності його проведення.

Отже, існуючий зв'язок між обсягом ТО, що планується і величиною виграшу від нього в ефективності застосування зразка РЕТ, дозволяє поставити завдання, щодо визначення необхідного обсягу ТО в залежності від наявного часу на його проведення.

В якості показника ефективності ТО зразка РЕТ (η) можна прийняти виграш у прирості величини ефективності використання зразка РЕТ за призначенням за умов проведення на ньому ТО. Цей показник може бути визначений як співвідношення ефективності використання зразка РЕТ за призначенням, на якому ТО проведено (W), до ефективності його використання за умов, якщо ТО на ньому не проводилося (W'):

$$\eta = \frac{W}{W'} \quad (1)$$

Кількісно, ефективність використання зразка РЕТ за призначенням (W) можна оцінити імовірністю виконання ним завдань на потрібному рівні за певний час :

$$W = P_{\text{ТО}}(T) \cdot P_{\text{над}} \cdot P_{\text{ТО}}^0, \quad (2)$$

де $P_{\text{ТО}}(T) = f(\mu, T)$ – імовірність виконання ТО на зразку РЕТ з інтенсивністю (μ) за час не більше встановленого (T);

$P_{\text{над}}$ – імовірність знаходження зразка РЕТ у справному стані до моменту початку його використання за призначенням і безвідмовної його роботи протягом часу виконання завдання;

$P_{\text{ТО}}^0$ – імовірність виконання зразком РЕТ завдання на необхідному рівні протягом певного часу за умов, що зразок РЕТ працював безвідмовно і не потребує ТО.

Слід зазначити, що у виразі (2), добуток $P_{\text{ТО}}(T) \cdot P_{\text{над}}$ буде безпосередньо впливати на ефективність використання зразка РЕТ за призначенням, який пов'язаний з його технічною експлуатацією та надійністю.

Використовуючи (1) і значення $P_{\text{над}}$ з виразу (2) отримаємо:

$$\eta = P_{\text{ТО}}(T) \cdot \frac{P_{\text{над}}(t_{\text{вз}})}{P'_{\text{над}}(t_{\text{вз}})}, \quad (3)$$

де $P_{\text{над}}(t_{\text{вз}})$, $P'_{\text{над}}(t_{\text{вз}})$ – імовірність знаходження зразка РЕТ у справному стані протягом його використання за призначенням і безвідмовної роботи протягом часу виконання завдання ($t_{\text{вз}}$) за умов проведення і не проведення на ньому ТО відповідно.

Якщо ТО на зразку РЕТ проводилося, то $P_{\text{ТО}}(T) = 1$.

Безпосередньо з виразу (1) слідує, що проведення ТО, при заданому часі на його проведення, буде виправданим тільки при виконанні умови, що $\eta > 1$. Це означає, що при розгляді питання про доцільність проведення ТО на зразку РЕТ виконання умови $P_{\text{над}} > P'_{\text{над}}$ ще не достатньо для прийняття обґрунтованого рішення на його проведення.

Для оцінювання ефективності ТО зразка РЕТ (η) у запланованому обсязі робіт, необхідно визначити її аналітичну залежність від параметрів ТО та надійності обладнання зразка РЕТ. Для цього розглянемо задачу в наступній постановці.

Обладнання зразка РЕТ складається із n окремих елементів (приладів, блоків, вузлів), які у разі відмови одного, можуть привести до виходу з

ладу іншого елементу та усього зразка РЕТ у цілому.

Тривалість виконання операції з ТО є випадковою величиною. Під операцією слід розуміти контроль технічного стану окремого елемента (приладу, блока, вузла) та усунення виявлених несправностей і дефектів [7, 9].

Час, який можна використати на проведення ТО з метою забезпечення максимальної надійності зразка РЕТ, обмежений, а його величина відома (T).

Будемо вважати, що наступні статичні показники ТО і надійності кожного із n окремих елементів зразка РЕТ відомі:

P'_i – імовірність справного стану i -го елемента зразка РЕТ до початку ТО.

На практиці величину P'_i нескладно отримати як відношення числа однотипних елементів (приладів, блоків, вузлів), що опинились за результатами перевірки справними, до загального числа перевірених аналогічних елементів (приладів, блоків, вузлів) протягом деякого періоду використання.

m_{τ_i} – середня тривалість i -ї операції (математичне сподівання (МСп) тривалості ТО i -го елемента (τ_i)).

$\sigma_{\tau_i}^2$ – дисперсія тривалості i -ї операції.

Два останніх параметри також можна знайти статичним шляхом за даними хронометражу ТО.

Під час планування ТО потрібно визначати такий перелік операцій, виконання яких би забезпечило ефективне його проведення. Тобто, потрібно знайти оптимальний обсяг ТО для заданого (наявного) часу на його проведення.

Вочевидь, що чим більше операцій ТО буде заплановано і виконано (чим більше окремих елементів (приладів, блоків, вузлів) буде піддано перевірці з усуненням можливих несправностей), тим більше буде імовірність знаходження зразка РЕТ у справному стані після його проведення.

Проте збільшення числа операцій ТО, які плануються до виконання, знижує імовірність їх завершення протягом наявного часу на проведення ТО. При цьому небайдуже, які саме операції будуть виконуватись, оскільки у загальному випадку величини $P'_{\text{над}i}$, m_{τ_i} , $\sigma_{\tau_i}^2$ можуть мати самі різні відношення.

Зрозумілим є те, що число можливих варіантів проведення ТО при n можливих операціях його проведення буде дорівнювати сумі числа поєднань із n по 1, по 2, по 3 і т. д., аж до n .

Накладемо ряд обмежень на умови дослідження, а саме:

зразок РЕТ може бути допущений до використання за призначенням за умов проведення на ньому відповідного виду ТО у заданому (запланованому) обсязі;

глибина і достовірність контролю для кожного n -го окремого елемента (приладу, блоку, вузла) такі, що після завершення i -ї операції справність відповідного елемента (приладу, блоку, вузла) стає достовірною подією, оскільки $P'_{\text{над}i} = 1$.

Імовірність виконання визначеної кількості операцій ТО (k) на n елементах (приладах, блоках, вузлах) зразка РЕТ протягом часу T можна позначити через імовірність його технічної готовності ($P_{\text{тг}}(T, k)$)

Тоді для зразка РЕТ, який складається з n елементів (приладів, блоків, вузлів), з урахуванням (3) та визначеної кількості операцій ТО (k), можна розрахувати ефективність його проведення (η):

$$\eta(T, k) = P_{\text{тг}}(T, k) \cdot \frac{\prod_{i=1}^k P_{\text{над}_i} \prod_{i=k+1}^n P'_{\text{над}_i}}{\prod_{i=1}^n P_{\text{над}_i}} \quad (4)$$

Враховуючи те, що $P_{\text{над}_i} = 1$, вираз (4) приймає наступний вигляд:

$$\eta(T, k) = P_{\text{тг}}(T, k) \cdot \frac{1}{\prod_{i=1}^k P'_{\text{над}_i}} \quad (5)$$

Якщо відомий закон розподілу тривалості ТО із k послідовно виконаних операцій, то можна розрахувати і побудувати залежність $\eta(T, k)$ від T при різних значеннях k для кожного зразка РЕТ. Наявність таких залежностей забезпечить можливість вибору оптимального часу на проведення відповідного типу ТО.

З урахуванням визначених часових показників тривалості проведення кожної запланованої операції (m_{τ} , σ_{τ}) можна розрахувати імовірність технічної готовності відповідного зразка РЕТ ($P_{\text{тг}}(T, k)$), значення якої дорівнює:

$$P_{\text{тг}}(T, k) = p(\tau_{(k)} < T) = 1 - e^{-\mu_{(k)}[T - \tau_{0(k)}]}, \quad (6)$$

якщо $T > \tau_{0(k)}$,

$$P_{\text{тг}}(T, k) = p(\tau_{(k)} < T) = 0, \text{ якщо } T \leq \tau_{0(k)}, \quad (7)$$

де $\mu_{(k)} = \frac{1}{\sigma_{\tau(k)}}$ – інтенсивність проведення ТО;
 $\tau_{0(k)} = m_{\tau(k)} - \sigma_{\tau(k)}$ – величина, яка характеризує мінімально необхідний час на проведення ТО.

Для проведення усіх запланованих k операцій ТО, які виконуються послідовно, значення величин $m_{\tau(k)}$ та $\sigma_{\tau(k)}$ розраховується за наступними виразами:

$$m_{\tau(k)} = \sum_{i=1}^k m_{\tau_i}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\tau(k)} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \sigma_{\tau_i}^2}. \quad (9)$$

Отже, за результатами оцінювання ефективності ТО (5) з урахуванням визначених часових показників тривалості проведення кожної операції ТО та розрахованої імовірності технічної готовності зразка РЕТ (6), (7), можна розрахувати

та визначити залежність ефективності ТО з різним обсягом робіт від наявного часу на його проведення та обрати оптимальний варіант проведення ТО в умовах обмеженого часу його проведення (див. рис. 1).

В якості пояснювального прикладу, розглянемо варіант підготовки РЕТ зведеного радіотехнічного підрозділу (ЗвП) у складі РЛС типу П-18 “Малахіт”, РРВ-16МА та НРЗ 1-Л22 до виконання бойових завдань відповідно до спланованого графіку ТО в умовах обмеженого часу на його проведення.

Успішне виконання ЗвП бойових завдань можливе за умов справності всіх трьох зразків РЕТ, які входять до його складу. Час, відведений на підготовку зразків РЕТ ЗвП до використання за призначенням, обмежений, його може не вистачити для перевірки всіх зразків РЕТ (під перевіркою мається на увазі визначення та усунення несправностей). Необхідно визначити мінімальний обсяг ТО, без виконання якого зразки РЕТ не можуть бути допущені до використання за призначенням.

Вочевидь необхідно зупинитися на одному із наступних несумісних варіантів:

А – проведення ТО тільки на РЛС.

В – проведення ТО тільки на НРЗ.

С – проведення ТО тільки на РРВ.

АВ – послідовне виконання операцій за варіантами А і В (або В і А).

АС – послідовне виконання операцій за варіантами А і С (або С і А).

ВС – послідовне виконання операцій за варіантами В і С (або С і В).

АВС – проведення ТО на всіх зразках РЕТ.

Виконання ТО по кожному із варіантів призводить до різного підвищення імовірності справного стану зразків РЕТ, оскільки $P'_{\text{над}_A} \neq P'_{\text{над}_B}$; $P'_{\text{над}_A} \neq P'_{\text{над}_C}$; $P'_{\text{над}_B} \neq P'_{\text{над}_C}$. При цьому $m_{\tau_A} \neq m_{\tau_B}$, $\sigma_{\tau_A} \neq \sigma_{\tau_B}$, $m_{\tau_A} \neq m_{\tau_C}$, $\sigma_{\tau_A} \neq \sigma_{\tau_C}$, $m_{\tau_B} \neq m_{\tau_C}$, $\sigma_{\tau_B} \neq \sigma_{\tau_C}$.

Таким чином, імовірність завершення ТО за відведений час для кожного варіанту різна. В процесі експлуатації не важко знайти статистичним шляхом числові значення всіх перерахованих параметрів. Їх завжди можна підрахувати по хронометражу витрати часу на проведення ТО і результатам проведеної перевірки технічного стану відповідного зразка РЕТ.

Обсяг перевірки кожного зразка РЕТ має бути достатнім, для того, щоб після завершення ТО на i -му виді обладнання, можна було би з високим ступенем достовірності рахувати його апаратуру працездатною, тобто $P_{\text{над}_i} = 1$.

За цієї умови загальна надійність усіх зразків РЕТ ЗвП після проведення ТО, наприклад, за варіантом А, буде визначатися добутком $P'_{\text{над}_B} \times P_{\text{над}_C}$, по варіанту АВ – величиною $P_{\text{над}_C}$, а по варіанту АВС буде дорівнювати одиниці.

Проведений аналіз залежностей $\eta(T, k)$ від T дозволяє визначити необхідний обсяг ТО РЕТ за визначений період часу.

Якщо час, відведений на підготовку зразка РЕТ, позначити через T_n , то при $T_n < T_1$ вочевидь, планувати і проводити ТО на РЕТ недоцільно.

За умови $T_1 < T_n \leq T_2$ планування ТО на РЕТ доцільно провести за варіантом С, тобто провести ТО тільки на РРВ.

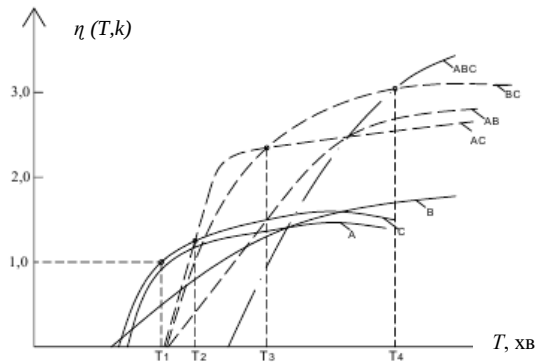


Рис. 1. Залежність ефективності ТО РЕТ від встановленого часу на його проведення

Якщо час на проведення ТО обмежений (визначається умовою $T_2 < T_n \leq T_3$) то найбільш ефективне проведення ТО буде забезпечуватися за варіантом АС (поєднання виконання операцій ТО на РЛС та РРВ).

За умови $T_3 < T_n \leq T_4$ доцільно проводити ТО на РЕТ за варіантом ВС (поєднання виконання операцій ТО на РРЗ та РРВ).

За умови $T_n > T_4$ планування ТО доцільно проводити на всіх трьох зразках РЕТ, тобто за варіантом АВС.

Якщо обраний обсяг ТО буде виконаний до закінчення встановленого часу T , то за обсягом часу що залишився, використовуючи ті ж самі залежності $\eta(T,k)$ від T , можна визначити доцільність проведення ТО на інших елементах (приладах, блоках, вузлах) зразка РЕТ які не були заплановані для їх обслуговування.

Обговорення

У статті, з метою підвищення інформативності оцінювання можливостей системи експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ РТВ щодо виконання покладених на неї завдань, обґрунтовано підходи до визначення необхідного обсягу ТО РЕТ РТВ в умовах обмеженого часу на його проведення під час бойового застосування радіотехнічних військ.

Висновки

Використання запропонованих підходів дозволить: кількісно і якісно оцінити можливості сил і засобів системи експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ РТВ, щодо організації і проведення ТО на різних за функціональним призначенням зразках РЕТ в умовах обмеженого часу на його проведення; оперативно проводити корекцію планів з організації експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ РТВ, обґрунтовано приймати рішення щодо своєчасного планування та проведення ТО на різних за функціональним призначенням зразках РЕТ під час їх використання

за призначенням в умовах обмеженого часу на його проведення, що безумовно позитивно вплине на реалізацію бойових можливостей РТВ під час їх бойового застосування, що підтверджується досвідом підготовки та застосування військ, ОВТ у російсько-українській війні [3].

Матеріали статті можуть бути корисними для фахівців оперативної і тактичної ланок управління, які займаються питаннями удосконалення функціонування систем експлуатації та ремонту (відновлення) ОВТ родів військ ПС ЗС України з метою підтримання їх у постійній готовності до використання за призначенням.

У подальшому, за обраним напрямком дослідження, доцільно провести оцінювання ефективності функціонування системи ТО ОВТ РТВ під час бойового застосування з урахуванням запропонованих підходів до організації і проведення ТО на різних за функціональним призначенням зразках РЕТ у визначених умовах обстановки.

Список використаних джерел

1. Шамко В. Є. Розвиток форм і способів застосування Повітряних Сил Збройних Сил України в сучасних умовах ведення збройної боротьби / В. Є. Шамко, О. М. Жарик, В. В. Коваль // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків : ХНУПС, 2018. № 2 (31). С. 9–15.
2. Тимчасова Доктрина застосування сил оборони України (СП 3-00(04).01). К. : ГОУ ГШ ЗСУ, ЦНДІ ЗСУ, 2025. 50 с.
3. Воєнно-історичний опис російсько-української війни / робоча група на чолі з генералом В. Залужним. К. : МОУ, Апарат ГШ ЗСУ, ГШ ЗСУ, ЦДВІ ЗСУ, 2023. Вип. №17. 208 с.
4. Доктрина з охорони повітряного простору та протиповітряного прикриття важливих державних і військових об'єктів (ВКДП 3-08(01).01) : затверджена Головнокомандувачем ЗС України 25 грудня 2020 року. Вінниця : КПС ЗСУ спільно з ХНУПС, 2020. 34 с.
5. Тактика радіотехнічних військ : навчальний посібник / Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, В. І. Боровий та ін.; за заг. ред. Г. В. Худова. Х. : ХНУПС, 2018. 240 с.
6. Доктрина Об'єднана логістика (ВКП 4-00(01).01) : затверджена Головнокомандувачем Збройних Сил України від 19.09.2020 року. К. : ГУЛ ГШ ЗСУ, ЦНДІ ЗСУ, 2020. 39 с.
7. Організація експлуатації та ремонту озброєння та військової техніки радіотехнічних військ : навчальний посібник / Юфа Є. А., Пуховий О. В., Попов С. Е. та інші. Київ : НУОУ, 2023. 148 с.
8. ДСТУ 2860:1994. Видання. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. Київ, 1996. 26 с.
9. Соловйов В. І. Організація експлуатації авіаційної техніки : монографія. Київ : НАОУ, 2005. 222 с.
10. Бабкін Ю. В., Оліфіренко В. С. Аналіз існуючих засобів технічного обслуговування та пропозиції щодо скорочення часу на технічне обслуговування бронетанкового озброєння та військової техніки у польових умовах. Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : зб. тез. доп. XXVII Міжнародної наук.-практ. конф., 15–17 трав. 2019 р. Харків : ХПІ, 2019. С. 16. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/44984/1/MicroCAD_2019_Babkin_Analiz_isnuuiuchykh.pdf.

11. Gallasch Guy E., J. Lilith. Modelling Defence Logistics Networks. International Journal on Soft-ware Tools for Technology Transfer. 2008. № 1(10). P. 75–79. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.85.9536>.

12. Наконечний О. В. Методика оцінювання ефективності функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2020. № 1(38). С. 54–60. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.38.06>.

13. Креденцер Б.П. Модель періодичного технічного обслуговування об'єктів озброєння та військової техніки / Б.П. Креденцер, О.П. Волох // 36. наук. пр. ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2005. №2. С.53–56.

14. Старцев В. В., Третяк В. Ф., Бровко М. Б., Джигірей В. О., Коломійцев О. В. Підходи щодо підтримки рішення на виконання заходів з відновлення озброєння та військової техніки в системі логістичного забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Чернігів : ДНДІ ВС ОВТ, 2022. Вип. 1(11). С. 116–126. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/155>.

15. Старцев В. В., Мусієнко О.П., Гурін О. М., Просяник В. В., Коломійцев О. В. Методика оцінювання

ефективності відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Чернігів : ДНДІ ВС ОВТ, 2022. Вип. 2(12). С. 134–144.

<https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14>.

16. Старцев В. В. Основні положення методики оцінювання можливостей відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України, пошкоджених під час ведення бойових дій / В. В. Старцев, В. Ф. Третяк, Л. В. Міхальова, О. В. Коломійцев, В. В. Борщ, Р. М. Олійник // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Чернігів : ДНДІ ВС ОВТ, 2022. Вип. 3(13). С. 110–120.

<https://doi.org/10.37701/dndivsovt.13.2022.12>.

17. Войтенко С.С., Бабич О.О. Метод планування технічного обслуговування військового ремонту озброєння та військової техніки в сучасних умовах. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. Харків : ХНУПС, 2021. Вип. 3(69). С. 50–54. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.06>.

Serhii Popov (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-7410-1267>

Yevhen Yufa (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-6362-5986>

Valerii Bondar (Doctor of Philosophy)

<https://orcid.org/0000-0001-8843-680X>

Borys Yelizarov

<https://orcid.org/0009-0002-2564-2491>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

JUSTIFICATION OF APPROACHES TO DETERMINING THE REQUIRED LEVEL OF TECHNICAL MAINTENANCE OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT IN THE CONDITIONS OF LIMITED TIME FOR ITS IMPLEMENTATION CONDUCT DURING THE COMBAT USE OF RADIO-TECHNICAL TROOPS

The current conditions of armed confrontation in the airspace, the duration and intensity of warfare, create the prerequisites for an increase in the number of failures of radio-electronic equipment as a result of operational and combat damage. Reducing the number of failures of radio-electronic equipment for operational reasons during combat use can be solved by timely planning and high-quality maintenance.

In the article, in order to increase the informativeness of assessing the capabilities of the system of operation and repair (restoration) of weapons and military equipment of radio-technical troops to perform the tasks assigned to it, approaches to determining the required level of technical maintenance of radio-electronic equipment of radio-technical troops in conditions of limited time for its implementation are substantiated. The study was conducted using well-known scientific methods, in particular, systems analysis, probability theory and mass service systems, which allowed to describe with sufficient completeness and accuracy the main processes circulating in the system of restoration and repair of weapons and military equipment of radio-technical troops during combat use. The proposed approaches should be used in further scientific research on improving the efficiency of operation and repair (restoration) of weapons and military equipment of radio-technical troops and the effectiveness of their combat use. The materials of the article can also be useful for specialists of operational and tactical management levels who are engaged in improving the functioning of systems for operation and repair (restoration) of weapons and military equipment of the Air Force branches in order to maintain them in constant readiness for use for their intended purpose.

Keywords: *life cycle, technical utilization factor, unit costs, maintenance, technical and economic efficiency.*

References

1. Shamko V. Ye. Rozvytok form i sposobiv zastosuvannya Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy v suchasnykh umovakh vedennia zbroinoi borotby / V. Ye. Shamko, O. M. Zharyk, V. V. Koval // *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. Kharkiv : KhNUPS, 2018. № 2 (31). S. 9–15.
2. Tymchasova Doktryna zastosuvannya syl oborony Ukrainy (SP 3-00(04).01). K. : HOU HSh ZSU, TsNDI ZSU, 2025. 50 c.
3. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny / robocha hrupa na choli z heneralom V. Zaluzhnyym. K. : MOU, Aparat HK ZSU, HSh ZSU, TsDVI ZSU, 2023. Vyp. №17. 208 s.
4. Doktryna z okhorony povitrianoho prostoru ta protypovitrianoho prykryttia vazhlyvykh derzhavnykh i viiskovykh ob'ektiv (VKDP 3-08(01).01) : zatverdzhena Holovnokomanduvachem ZS Ukrainy 25 hrudnia 2020 roku. Vinnytsia : KPS ZSU spilno z KhNUPS, 2020. 34 s.
5. Taktyka radiotekhnichnykh viisk : navchalnyi posibnyk / H. V. Khudov, B. V. Bakumenko, V. I. Borovyi ta in.; za zah. red. H. V. Khudova. Kh. : KhNUPS, 2018. 240 s.
6. Doktryna Obiednana lohistyka (VKP 4-00(01).01) : zatverdzhena Holovnokomanduvachem Zbroinykh Syl Ukrainy vid 19.09.2020 roku. K. : HUL HSh ZSU, TsNDI ZSU, 2020. 39 s.
7. Orhanizatsiia ekspluatatsii ta remontu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki radiotekhnichnykh viisk : navchalnyi posibnyk / Yufa Ye. A., Pukhovyi O. V., Popov S. E. ta inshi. Kyiv : NUOU, 2023. 148 s.
8. DSTU 2860:1994. Vydannia. Nadiinist tekhniki. Terminy ta vyznachennia. Chynnyi vid 1996-01-01. Kyiv, 1996. 26 s.
9. Soloviov V. I. Orhanizatsiia ekspluatatsii aviatsiinoi tekhniki : monohrafiia. Kyiv : NAOU, 2005. 222 s.
10. Babkin Yu. V., Olifirenko V. S. Analiz isnuichykh zasobiv tekhnichnoho obsluhovuvannya ta propozyitsii shchodo skorochennia chasu na tekhnichne obsluhovuvannya bronetankovoho ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki u polovykh umovakh. Informatsiini tekhnolohii : nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : zb. tez. dop. KhXVII Mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf., 15–17 trav. 2019 r. Kharkiv : KhPI, 2019. S. 16. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/44984/1/MicroCAD_2019_Babkin_Analiz_isnuichykh.pdf.
11. Gallasch Guy E., J. Lilith. Modelling Defence Logistics Networks. *International Journal on Soft-ware Tools for Technology Transfer*. 2008. № 1(10). P. 75–79. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.85.9536>.
12. Nakonechnyi O. V. Metodyka otsiniuvannya efektyvnosti funktsionuvannya systemy lohistychnoho zabezpechennia syl oborony derzhavy. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2020. № 1(38). S. 54–60. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.38.06>.
13. Kredentser B.P. Model periodychnoho tekhnichnoho obsluhovuvannya ob'ektiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki / B.P. Kredentser, O.P. Volokh // *Zb. nauk. pr. VITI NTUU “KPI”*. 2005. №2. S.53–56.
14. Startsev V. V., Tretiak V. F., Brovko M. B., Dzhihirei V. O., Kolomiitsev O. V. Pidkhody shchodo pidtrymky rishennia na vykonannya zakhodiv z vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki v systemi lohistychnoho zabezpechennia Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*. Chernihiv : DNDI VS OVT, 2022. Vyp. 1(11). S. 116–126. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/155>.
15. Startsev V. V., Musiienko O.P., Hurin O. M., Prosiannyk V. V., Kolomiitsev O. V. Metodyka otsiniuvannya efektyvnosti vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*. Chernihiv : DNDI VS OVT, 2022. Vyp. 2(12). S. 134–144. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14>.
16. Startsev V. V. Osnovni polozhennia metodyky otsiniuvannya mozhlyvosti vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy, poshodzhennykh pid chas vedennia boiovykh dii / V. V. Startsev, V. F. Tretiak, L. V. Mikhailova, O. V. Kolomiitsev, V. V. Borshch, R. M. Oliinyk // *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*. Chernihiv : DNDI VS OVT, 2022. Vyp. 3(13). S. 110–120. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.13.2022.12>.
17. Voytenko S.S., Babych O.O. Metod planuvannya tekhnichnoho obsluhovuvannya viys'kovoho remontu ozbroiennia ta viys'kovoi tekhniki v suchasnykh umovakh. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho natsional'noho universytetu Povitrianykh Syl im. I. Kozheduba*. Kharkiv : KHNUPS, 2021. Vyp. 3(69). S. 50–54. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.06>.

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-78-86

УДК 623.7.658.5

Громовий Ігор Борисович

<https://orcid.org/0009-0009-6340-9800>

Шкурят Богдан Жоржович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Дранник Павло Анатолійович (кандидат військових наук, старший науковий співробітник)

<https://orcid.org/0000-0002-6073-2962>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕМОНТУ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК

Ремонт сил і засобів протиповітряної оборони є невід’ємною складовою сучасних бойових дій. Постійний розвиток озброєння, удосконалення його конструкцій, умов застосування та висока динаміка обстановки вимагають від посадових осіб швидкого й обґрунтованого вибору способів відновлення боєздатності техніки. Недостатня ефективність таких рішень може призвести до зниження бойових можливостей підрозділів ППО. Для порівняння способів ремонту необхідні моделі оцінювання їх ефективності, однак наявні підходи не враховують комплексність системи технічного забезпечення, сучасну структуру ремонтно-відновлювальних органів та специфіку бойових умов.

Метою дослідження є удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту сил і засобів ППО на основі системного врахування вихідних даних і факторів обстановки. Для цього використано методи системного аналізу, узагальнення, математичного моделювання та експертного оцінювання. Розроблена методика підвищує точність оцінювання та дозволяє прогнозувати ефективність і якість ремонту в реальних умовах. Результати дослідження можуть бути корисними посадовим особам, які організовують процес ремонту, та науковцям, що досліджують проблематику технічного забезпечення й відновлення озброєння.

Ключові слова: оцінювання ефективності, ефективність ремонту, методика оцінювання ефективності ремонту, середній час ремонту, інтегральний показник.

Вступ

Сучасні збройні конфлікти, зокрема російсько-українська війна, підкреслюють критичну роль технічного забезпечення у підтриманні боєздатності військ. Для системи протиповітряної оборони (ППО) України, основу якої складають зенітні ракетні війська (ЗРВ), технічна готовність озброєння та військової техніки (ОВТ) безпосередньо визначає здатність виконувати завдання з прикриття важливих об’єктів і угруповань військ. Втрата працездатності навіть одного зразка зенітного ракетного комплексу (ЗРК) або системи (ЗРС) призводить до зниження стійкості оборони, а тому оперативний і якісний ремонт стає ключовим чинником забезпечення виконання завдань підрозділами ЗРВ [1, 2].

Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні науково обґрунтованої методики оцінювання ефективності ремонту ОВТ у змішаних угрупованнях ЗРВ, де одночасно експлуатуються системи різних стандартів, зразки іноземного і радянського виробництва. Такий підхід відповідає тенденціям розвитку систем технічного забезпечення у країнах НАТО, де питання ефективності ремонту розглядається як складова інтегрованої логістичної підтримки (Integrated Logistic Support — ILS) [3-5].

Питання оцінювання ефективності ремонту розглянуто у низці навчальних та наукових робіт.

Зокрема, в [6] розглянуто методики оцінювання можливостей ремонтно-відновлювальних органів з проведення технічного обслуговування, поточного та середнього ремонтів техніки. В [7] розроблено методику визначення трудомісткості ремонтних робіт і розрахунку постів та площ; в [8] запропоновано підходи до оцінювання ефективності окремих ремонтних операцій; у [9] — методичні рекомендації з організаційно-структурного вдосконалення системи ремонту. Водночас ці методики не враховують впливу оперативної обстановки, реального навантаження особового складу в бойових умовах та рівня його підготовленості. Міжнародний досвід, викладений у дослідженнях [10, 11] підтверджує, що ефективність ремонтно-відновлювальної системи залежить не лише від технічних, та часових факторів, але й від організації та якості ремонту. Необхідність подальшого дослідження зумовлена потребою адаптації методики до сучасних умов ведення бойових дій, постійного оновлення вагових коефіцієнтів, розроблення цифрових інструментів моніторингу ефективності ремонту й удосконалення системи підготовки спеціалістів ремонтних органів.

Метою дослідження є удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту сил і засобів ППО.

У роботі виконано аналіз наявних методик та часткових показників ефективності (оперативність,

своєчасність, якість, надійність, технічна готовність, економічність), здійснено їх

інтеграцію в єдиний узагальнений показник ефективності, проведено первинну апробацію запропонованої методики та розроблено базові рекомендації щодо її використання у системах управління ремонтом озброєння та військової техніки.

Головна гіпотеза дослідження полягає в тому, що інтеграція часткових показників ефективності ремонту (оперативність, своєчасність, якість, надійність, технічна готовність, економічність) у єдиний інтегральний показник, доповнений коефіцієнтом підготовленості персоналу, який дозволить підвищити точність оцінювання результатів ремонтних процесів і забезпечить підвищення рівня боєготовності угруповань ЗРВ.

Основними припущеннями при цьому є такі:

ефективність ремонту визначається не лише технічними параметрами, а й організаційними, кадровими та часовими факторами;

інтегральна оцінка дозволяє забезпечити об'єктивне порівняння різних ремонтних органів;

підготовленість персоналу прямо впливає на скорочення середнього часу ремонту та збільшення частки перших успішних ремонтів.

Матеріали та методи

У процесі дослідження застосовано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів, що забезпечили досягнення поставленої мети та вирішення завдань роботи [12].

Проведено аналітичне опрацювання нормативно-методичних документів НАТО та України [3, 13, 14], а також існуючого науково-методичного апарату з питань організації та оцінювання ефективності ремонту озброєння і військової техніки [4-11, 15-21]. Це дозволило узагальнити сучасні підходи до технічного забезпечення та визначити напрями удосконалення.

Експертний застосовано для встановлення вагових коефіцієнтів часткових показників ефективності ремонту та проведення первинної апробації удосконаленої методики [12].

Кількісно-аналітичні методи (зокрема статистичний і кваліметричний аналіз) використано для розрахунку інтегрального коефіцієнта ефективності ремонту, оцінювання впливу удосконалень на середній час ремонту та рівень технічної готовності [12].

Графоаналітичний метод застосовано для візуалізації результатів оцінювання ефективності ремонту та порівняння варіантів організації ремонтного процесу.

Результати

У сучасних умовах інтенсивного застосування озброєння та військової техніки роль організації ремонту у забезпеченні боєздатності угруповань зростає. З метою прогнозування потреб військ у ремонті техніки та оперативного підтримання технічної готовності, необхідно впровадити узгоджену, формалізовану та адаптовану методику оцінювання його ефективності. Така методика має поєднувати якісні і кількісні підходи, враховувати специфіку зразків ОВТ, логістичні обмеження та фактор підготовки персоналу, а також передбачати

механізми перевірки та коригування на основі фактичних даних.

У зв'язку з цим запропоновано поетапну процедуру удосконалення методики оцінювання ремонту, що забезпечує системний підхід від формулювання завдання до практичної апробації та впровадження змін. Етапи удосконаленої методики оцінювання ремонту:

1. Формування мети та визначення об'єкта оцінювання. Метою оцінювання є визначення ефективності ремонтних робіт озброєння та військової техніки. Об'єктом виступає ремонт техніки (операції, їх тривалість, якість та результат), а предметом – показники, що характеризують якість та ефективність самого ремонту.

2. Вибір показників ефективності ремонту. Виділяються ключові показники: оперативність; своєчасність; якість ремонту; надійність після ремонту; технічна готовність; економічність. Також слід врахувати людський фактор. Використовується коефіцієнт підготовленості персоналу, що коригує основні показники.

3. Удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту шляхом формалізації розрахунків визначених показників. Для кожного показника вводяться відповідні показники і математичні вирази. Далі відбувається побудова інтегральної оцінки. Часткові показники нормалізуються і зважуються, формуючи інтегральний коефіцієнт ефективності.

4. Збір вихідних даних. Здійснюється накопичення та систематизація інформації, необхідної для проведення оцінювання ефективності ремонтних робіт. Основними джерелами отримання інформації є: звітні документи ремонтних органів, акти приймання здавання техніки після ремонту. Під час збирання інформації з звітних документів фіксуються наступні дані: кількість виконаних ремонтів за певний період часу; кількість зданої та прийнятої техніки; тривалість ремонтних операцій; кількість повторних відмов після ремонту; обсяг витрат матеріальних та трудових ресурсів; рівень технічної готовності після проведення ремонту. Далі зібрані дані потрібно перевірити на повноту, достовірність та узгодженість, після чого сформувати зведені таблиці для подальших розрахунків. Особлива увага приділяється фіксації факторів, що можуть вплинути на результат: умови виконання ремонту, рівня підготовленості персоналу, технічного забезпечення та наявності запасних інструментів та приладдя.

5. Розрахунок часткових показників. Обчислюються значення коефіцієнтів для кожного критерію та порівнюються з нормативами.

6. Аналіз результатів і формування висновків. Визначаються сильні та слабкі сторони ремонту, формуються рекомендації щодо його вдосконалення.

Основними показниками ефективності ремонту техніки є: оперативність; своєчасність; якість; надійність; технічна готовність; економічність.

Оперативність характеризує швидкість проведення ремонтних робіт від моменту виявлення несправності до здачі техніки в експлуатацію. Високий рівень оперативності дозволяє мінімізувати простой техніки та забезпечити її повернення у стрій у найкоротші терміни, що є критично важливим в умовах інтенсивного використання ОБТ. Показником, що характеризує оперативність ремонту, є середній час ремонту (MTTR) та коефіцієнт оперативності ремонту ($K_{оп}$).

Середній час ремонту (MTTR) визначається за формулою:

$$MTTR = \sum \frac{t_{ремі}}{N} \quad (1)$$

де: $t_{ремі_i}$ – фактичний час ремонту i -тої одиниці техніки, год;
 N – кількість ремонтів.

Коефіцієнт оперативності ремонту знаходиться наступним чином:

$$K_{оп} = \frac{T_{норм}}{T_{факт}} \quad (2)$$

де $T_{норм}$ – нормативний час ремонту, год,
 $T_{факт}$ – фактичний час ремонту, год.

Своєчасність відображає дотримання встановлених термінів виконання ремонту відповідно до плану бойової підготовки чи графіка експлуатації. Навіть швидко виконаний ремонт може бути малоефективним, якщо він не збігається з потребами у використанні техніки. Тому своєчасність є одним із ключових чинників підтримання безперервності застосування ОБТ. Показником, що характеризує своєчасність виступає коефіцієнт своєчасності ($K_{св}$), який знаходиться за виразом:

$$K_{св} = \frac{N_{вч}}{N_{заг}} \quad (3)$$

де $N_{вч}$ – кількість ремонтів, завершених у строк,
 $N_{заг}$ – загальна кількість ремонтів;

Якість ремонту визначається ступенем відповідності техніки після ремонту встановленим технічним нормам і вимогам експлуатації. Вона відображає правильність виконання робіт, повноту усунення несправностей та відсутність повторних відмов у найближчий час після здачі відремонтованого зразка. Висока якість ремонту знижує потребу у повторних втручаннях, що сприяє підтриманню постійної боєздатності та витраті додаткового часу ремонтного персоналу на усунення виявлених несправностей. Показниками, що характеризують якість виступають: коефіцієнт приймання ремонту $K_{п}$ та показник “першого успішного ремонту” (First Time Fix – FTF).

Коефіцієнт приймання ремонту знаходиться за співвідношенням:

$$K_{п} = \frac{N_{прз 1}}{N_{здан}} \quad (4)$$

де $N_{прз 1}$ – кількість одиниць техніки, прийнятих без зауважень,
 $N_{здан}$ – кількість зданої техніки після ремонту.

Показник “першого успішного ремонту” (FTF) визначається за формулою:

$$FTF = \frac{N_{безпов}}{N_{здан}} \quad (5)$$

де $N_{безпов}$ – кількість одиниць техніки, що не вийшли з ладу в гарантійний термін,
 $N_{здан}$ – кількість зданої техніки;

Надійність характеризує тривалість безвідмовної роботи техніки після ремонту. Це інтегральний показник, що враховує якість відновлення ресурсів вузлів і агрегатів, точність регулювальних робіт та використання якісних запасних частин. Висока надійність ремонту означає, що техніка буде справною протягом тривалого часу без додаткового втручання. Показником, що характеризує надійність виступає коефіцієнт надійності після ремонту ($K_{н}$):

$$K_{н} = \frac{MTBF_{п}}{MTBF_{н}} \quad (6)$$

де $MTBF_{п}$ – середній наробіток на відмову після ремонту, год,
 $MTBF_{н}$ – нормативний середній наробіток на відмову, год;

Технічна готовність відображає реальну доступність техніки до використання за призначенням у будь-який момент часу. Вона враховує як тривалість перебування у справному стані, так і простой, викликані ремонтами чи очікуванням запчастин. Для військової техніки цей критерій особливо важливий, оскільки безпосередньо визначає здатність підрозділу виконувати завдання. Показниками, що характеризують технічну готовність є: коефіцієнт технічної готовності ($K_{тг}$) та коефіцієнт експлуатаційної готовності (A_0).

Коефіцієнт технічної готовності характеризується співвідношенням часу справної роботи зразка ОБТ до загального часу експлуатації, який включає час простою внаслідок відмов та ремонту:

$$K_{тг} = \frac{T_{успр}}{(T_{успр} + T_{прост})} \quad (7)$$

де $T_{успр}$ – час у справному стані, год;
 $T_{прост}$ – час простою через ремонт, год.

Коефіцієнт експлуатаційної готовності є співвідношенням середнього наробітку зразка ОБТ до загального часу включно з ремонтом:

$$A_o = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)} \quad (8)$$

де $MTBF$ – середній наробіток на відмову, год;
 $MTTR$ – середній час ремонту, год.

Економічність відображає доцільність витрат на проведення ремонту у порівнянні з придбанням нового зразка техніки. Вона враховує прямі матеріальні витрати, вартість праці, логістичні витрати та ефект від продовження ресурсу машини. Ремонт вважається економічно доцільним, якщо його вартість суттєво нижча від ціни нового зразка при забезпеченні необхідної якості та надійності. Економічний показник ефективності ремонту (E_v) виступає основним показником та знаходиться за формулою:

$$E_v = \frac{C_{нов} - C_{рем}}{C_{нов}} \quad (9)$$

де $C_{нов}$ – вартість нового зразка техніки, грошових одиниць;

$C_{рем}$ – витрати на ремонт, грошових одиниць.

Інтегральна оцінка ефективності ремонту.

Для комплексної оцінки вводиться інтегральний показник ефективності:

$$K_{эф} = \alpha \cdot K_{оп} + \beta \cdot K_{св} + \gamma \cdot K_{п} + \delta \cdot FTF + \varepsilon \cdot K_{н} + \zeta \cdot K_{тг} + \eta \cdot E_v \quad (10)$$

де $\alpha \dots \eta$ – вагові коефіцієнти для кожного показника, встановлені експертно.

Інтегральна оцінка ефективності ремонту враховує вплив усіх часткових показників за основними критеріями – оперативністю, своєчасністю, якістю, надійністю, технічною готовністю, економічністю, а також критерієм «першого успішного ремонту», (табл. 1, рис. 1).

Для кожного показника встановлюються **вагові коефіцієнти ($\alpha \dots \eta$)**, що визначають його відносну значущість у загальній оцінці.

Значення вагових коефіцієнтів визначалися експертним шляхом на основі узагальненого досвіду ремонтних органів під час російсько-української війни [1, 2, 6, 15-17, 20] та практичного досвіду експертів (15 осіб) у сфері технічного забезпечення і ремонту озброєння та військової техніки.

Враховання впливу особового складу ремонтних органів.

Процес ремонту техніки безпосередньо залежить від рівня підготовки та професійної майстерності персоналу [16, 17]. Для урахування цього чинника до методики оцінювання вводиться коефіцієнт підготовленості персоналу (K_{oc}), який коригує основні показники:

$$MTTR' = MTTR \cdot K_{oc} \quad (11)$$

$$FTF' = FTF + \Delta_{oc} \quad (12)$$

$$K'_n = K_n + \Delta_{oc} \quad (13)$$

де K_{oc} – коефіцієнт підготовленості персоналу (0,6–1,0 залежно від рівня навченості),

Δ_{oc} – поправка, що визначає приріст до якісних показників (–0,05– +0,15).

Таблиця 1

Розподіл вагових коефіцієнтів у інтегральному показнику $K_{эф}$

Показник	Оперативність	Своєчасність	Якість ремонту	FTF	Надійність	Техн. готовність	Економічність
Значення	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1

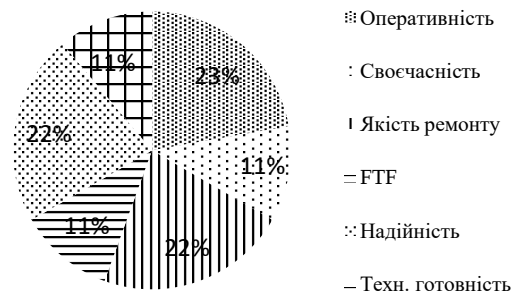


Рисунок 1 – Розподіл вагових коефіцієнтів в інтегральному показнику $K_{эф}$

Значення коефіцієнту підготовленості персоналу та поправки, що визначає приріст до якісних показників **встановлено експертним шляхом на основі узагальненого досвіду ремонтних органів під час РУВ та власного практичного досвіду** у сфері технічного забезпечення і ремонту озброєння та військової техніки ЗРВ.

Вплив підготовленості персоналу на середній час ремонту зображено на рисунку 2.

Дані для розрахунку часткових показників ефективності (табл. 2 та табл. 3) отримані на основі узагальненого аналізу нормативних методик розроблених [7-9] та та практичного досвіду експертів.

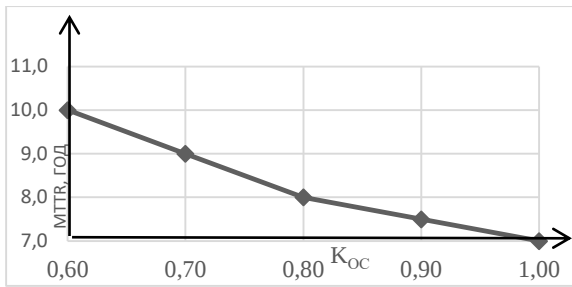


Рисунок 2 – Вплив підготовленості персоналу на середній час ремонту

Таблиця 2

Вплив підготовленості персоналу на середній час ремонту MTTR

K _{ос}	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
MTTR, год	10	9	8	7,5	7

Таблиця 3

Часткові показники ефективності ремонту

Показник	K _{оп}	K _{св}	K _п	FTF	K _н	K _{тг}	E _в
Значення	0,85	0,9	0,8	0,75	0,88	0,92	0,7

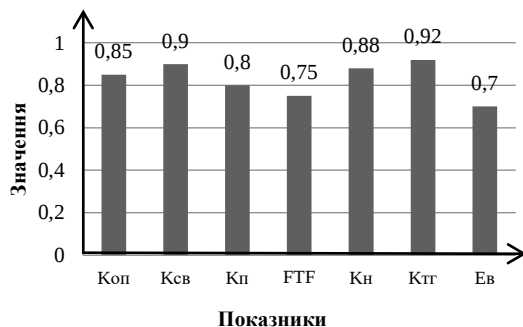


Рисунок 3 – Часткові показники ефективності ремонту (нормовані значення)

Отримані часткових показників ефективності (рис.3) дозволяють оцінити поточний стан ремонтних робіт та виділити ключові напрями їх вдосконалення.

Розглянута удосконалена методика оцінювання ремонту ОВТ, обґрунтована поетапною послідовністю дій — від формулювання мети й вибору показників до збору даних, розрахунків, апробації та подальшого впровадження. Аналіз існуючих методик показав, що кожна дає важливі інструменти (інженерно-розрахункові підходи, систему показників, структуральний аналіз), проте лише їх синтез урахує повний спектр технічних, організаційних і кадрових вимог, притаманних експлуатації комплексних зразків ОВТ у групування ЗРВ.

Особлива увага приділена нормалізації та зважуванню часткових показників (оперативність, своєчасність, якість, надійність, технічна

готовність, економічність, а також показник «першого успішного ремонту»), і введенню коефіцієнта підготовленості персоналу, як механізму врахування людського фактора. Такий підхід дозволяє отримати інтегральну, порівняльну й оперативно застосовану оцінку ефективності ремонту. Практична апробація на пілотних підрозділах з подальшим коригуванням методики є обов'язковим етапом для забезпечення її достовірності та прикладної придатності.

Очікувані результати впровадження: зниження середнього часу ремонту, підвищення технічної готовності й надійності техніки, оптимізація витрат матеріалів і людських ресурсів. Для досягнення цих цілей рекомендується реалізувати запропоновану методику поетапно з акцентом на збір якісних вихідних даних, цілеспрямоване навчання персоналу та регулярний моніторинг ефекту з періодичним оновленням методики відповідно до практичного досвіду.

Вихідні дані для розрахунків

Таблиця 4

Таблиця вихідних даних для розрахунків

Показник	Позначення	Значення	Примітки
Середній час ремонту	MTTR	8.0 год	усереднене значення (база)
Коефіцієнт оперативності	K _{оп}	0.85	ремонт трохи повільніше норми
Коефіцієнт своєчасності	K _{св}	0.9	90% у строки
Коефіцієнт приймання ремонту	K _п	0.8	прийнято з першого разу
Перший успішний ремонт	FTF	0.75	без відмов у гарантійний період
Надійність після ремонту	K _н	0.88	відносно нормативу
Технічна готовність	K _{тг}	0.92	частка часу у строю
Економічність	E _в	0.7	вигода чи нова закупівля

Усі коефіцієнти вказані в таблиці 4 прийняті експертним шляхом на основі власного практичного досвіду у сфері технічного забезпечення і ремонту озброєння та військової техніки ЗРВ, методичних матеріалів розроблених [7-9].

Розрахунок інтегрального показника (базовий варіант).

Інтегральний показник:

$$K_{\text{еф}} = \alpha \cdot K_{\text{оп}} + \beta \cdot K_{\text{св}} + \gamma \cdot K_{\text{п}} + \delta \cdot FTF + \varepsilon \cdot K_{\text{н}} + \zeta \cdot K_{\text{тг}} + \eta \cdot E_{\text{в}} \quad (14)$$

де $\alpha \dots \eta$ — вагові коефіцієнти для кожного показника, встановлені експертно ($\Sigma \alpha \dots \eta = 1$),

$K_{\text{оп}}$ — коефіцієнт оперативності ремонту (нормований 0–1),

$K_{\text{св}}$ — коефіцієнт своєчасності (частка ремонтів у строк),

- K_{Π} – коефіцієнт приймання ремонту (без зауважень),
 FTF – частка перших успішних ремонтів (без повторних відмов у гарантійний період),
 K_{Π} – надійність після ремонту (відносно нормативного $MTBF$),
 K_{Γ} – технічна готовність (частка часу у строю)
 $E_{\text{в}}$ – економічність (нормована вигода ремонту порівняно з новою закупівлею).

За умови прийнятих значень вагових коефіцієнтів ($\alpha=0,20$; $\beta=0,10$; $\gamma=0,20$; $\delta=0,10$; $\varepsilon=0,20$; $\zeta=0,10$; $\eta=0,10$) отримано внески часткових показників ефективності: $K_{\text{оп}}=0,85$, $K_{\text{св}}=0,9$, $K_{\Pi}=0,8$, $FTF=0,75$, $K_{\Pi}=0,88$, $K_{\Gamma}=0,92$, $E_{\text{в}}=0,7$. Інтегральний коефіцієнт ефективності при цьому складатиме: $K_{\text{еф}}(\text{база})=0,833$. Отримане значення ефективності ремонту хоч і є достатньо високим в прийнятих умовах, але свідчить про наявність недоліків у діяльності ремонтного органу та неповне використання його потенціалу. Це потребує подальшого вдосконалення системи організації та управління ремонтними процесами для досягнення оптимальних значень.

Запропоновані заходи з удосконалення ремонту:

1) підвищення кваліфікації персоналу, яке веде за собою скорочення середнього часу ремонту та зростання коефіцієнту приймання ремонту (без зауважень), частки перших успішних ремонтів (без повторних відмов у гарантійний період);

2) модернізація порядку діагностики може призвести до зростання частки перших успішних ремонтів (без повторних відмов у гарантійний період) і надійності після ремонту;

3) оптимізація витрат, яка веде до підвищення економічності.

Розрахунок інтегрального показника після удосконалень (виконання рекомендацій).

Інтегральний показник(після удосконалення):

$$K_{\text{еф}} = \alpha \cdot K_{\text{оп}} + \beta \cdot K_{\text{св}} + \gamma \cdot K'_{\Pi} + \delta \cdot FTF' + \varepsilon \cdot K'_{\Pi} + \zeta \cdot K_{\Gamma} + \eta \cdot E'_{\text{в}} \quad (15)$$

Підстановка (після удосконалення): $K_{\text{оп}}=0,9$, $K_{\text{св}}=0,92$, $K'_{\Pi}=0,88$, $FTF'=0,85$, $K'_{\Pi}=0,92$, $K_{\Gamma}=0,94$, $E'_{\text{в}}=0,8$.

В ході розрахунків отримано результат $K_{\text{еф}}(\text{після}) = 0,891$, який свідчить про підвищення ефективності ремонту.

Врахування кваліфікації персоналу.

Порівняння впливу підвищення кваліфікації персоналу на значення часткових показників та інтегральної ефективності ремонту наведено на рис. 4,5, та у табл. 5.

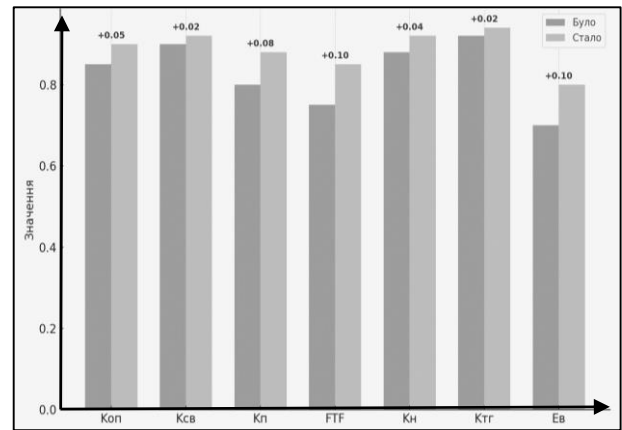


Рисунок 4 – Порівняння часткових показників ефективності ремонту

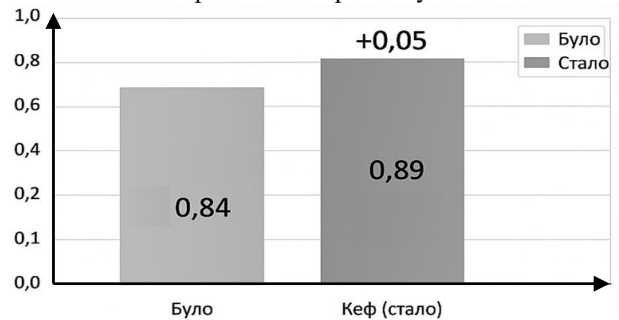


Рисунок 5 – Порівняння інтегрального показника ефективності.

Таблиця 5
Порівняльна таблиця часткових показників ефективності ремонту

Показник	Було	Стало
$MTTR'$	8,0 год	6,8 год
$K_{\text{оп}}$	0,85	0,9
$K_{\text{св}}$	0,9	0,92
K_{Π}'	0,8	0,88
FTF'	0,75	0,85
K_{Π}'	0,88	0,92
K_{Γ}	0,92	0,94
$E_{\text{в}}'$	0,7	0,8

Залежність середнього часу ремонту від підготовленості персоналу (табл. 6, рис. 6):

$$MTTR' = MTTR K_{\text{ос}} \quad (16)$$

де $MTTR$ – базовий середній час ремонту, год
 $K_{\text{ос}}$ – коефіцієнт підготовленості персоналу (чим менше значення, тим краща підготовка).

Таблиця 6
Таблиця впливу коефіцієнту підготовленості персоналу на час ремонту

$K_{\text{ос}}$	$MTTR'$, год
0.8	6.4
0.85	6.8
0.9	7.2
0.95	7.6
1.0	8.0

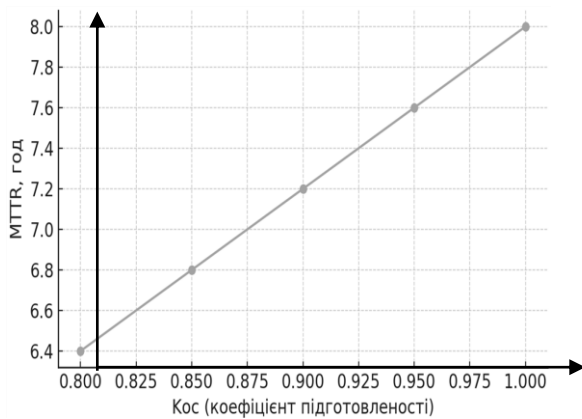


Рисунок 6 – Залежність середнього часу ремонту від підготовленості персоналу

Отже, проведені розрахунки показали наступні результати: базовий $K_{\text{ef}} \approx 0.84$; після удосконалень $K_{\text{ef}} \approx 0.89$. Абсолютний приріст = 0.058; відносний $\approx 6.96\%$.

Отримане значення інтегрального коефіцієнта ефективності після проведення удосконалень свідчить про **досягнення вищого рівня ефективності роботи ремонтного органу**. Порівняно з базовим показником інтегрального коефіцієнта ефективності, спостерігається **помітне зростання ефективності ремонту**, що є підтвердженням доцільності впроваджених заходів.

Обговорення

Підвищення кваліфікації персоналу, модернізація засобів діагностики та оптимізація витрат забезпечують комплексне покращення техніко-економічних параметрів ремонту. Зменшення середнього часу ремонту підвищує коефіцієнти оперативності та приймання ремонту, модернізована система контролю якості сприяє зростанню показників першого успішного ремонту та надійності після ремонту, а оптимізація витрат забезпечує раціональніше використання матеріальних ресурсів.

Застосування інтегрального показника ефективності дозволяє об'єктивно оцінити вплив організаційних та кадрових факторів на загальний результат ремонтних процесів. На прикладі розглянутого ремонтного органу реалізація запропонованих заходів підвищила його можливості забезпечення технічної готовності ОВТ та рівень ефективності, що відповідає сучасним вимогам до організації ремонтних процесів у військах.

Отримані результати дозволили сформулювати комплекс рекомендацій щодо підвищення ефективності ремонту ОВТ ЗРВ, зокрема:

- 1) Оптимізація структури та чисельності ремонтних органів з пріоритетним залученням фахівців вузького профілю (електроніка, гідравліка, механіка ракетних систем);
- 2) Удосконалення системи підготовки та підвищення кваліфікації персоналу з урахуванням специфіки обслуговування різномірних комплексів;
- 3) Впровадження сучасних методів

планування ремонту, що враховують реальну інтенсивність експлуатації та бойові пошкодження;

4) Оптимізація використання запасних частин, із забезпеченням пріоритетності для критичних вузлів і систем;

5) Впровадження методів діагностики та прогнозування відмов, що дозволяє зменшити частку аварійних ремонтів та збільшити обсяг планових робіт.

Практичні розрахунки показали, що реалізація зазначених заходів може забезпечити скорочення середнього часу ремонту на 10–15%, зниження витрат на 7–10% та підвищення коефіцієнта технічної готовності угруповання на 5–8%.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на автоматизацію збору та обробки даних про проведення ремонтів, аналіз відмов техніки та створення інтегрованої бази знань, що забезпечить оптимізацію організації та управління ремонтними процесами сил і засобів ППО.

Висновки

У статті запропоновано удосконалену методику оцінювання ефективності ремонту озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ, яка враховує інтеграцію технічних, організаційних та кадрових факторів. Розроблений інтегральний показник ефективності дозволяє комплексно оцінити вплив оперативності, своєчасності, якості ремонту, надійності, технічної готовності та економічності, а також показника “першого успішного ремонту”.

Практичного застосування методики показало, що підвищення кваліфікації персоналу, модернізація засобів діагностики та оптимізація витрат забезпечують зростання ефективності ремонту. Проведені розрахунки дозволили обґрунтувати ряд базових рекомендацій щодо вдосконалення організації ремонту.

Отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу до управління ремонтними органами та демонструють пріоритет кадрового потенціалу для досягнення високого рівня технічної готовності ОВТ. Методика може застосовуватися для планування, контролю та оптимізації ремонтної діяльності у військах.

Список використаних джерел

1. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року): навч. посіб. / М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, В. П. Бринцева. Київ : НУОУ, 2024. 96 с.
2. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року): навч. посіб. / Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, В. П. Бринцева. Київ : НУОУ, 2024. 103 с.
3. Управління надійністю. Частина 3-12. Посібник із застосування. Інтегрована логістична підтримка. ДСТУ EN 60300-3-12:2022 (EN 60300-3-12:2011, IDT; IEC 60300-3-12:2011, IDT). ДП “УкрНДНЦ”, Київ, 2022.

4. NATO Science & Technology Organization. 2022 Highlights, 2022. – 76 p. Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/230327-NATO-STO-Highlights.pdf.

5. П. В. Опенько, В. В. Поліщук, А. Г. Козир, М. Ю. Миронюк. Досвід застосування адаптивних стратегій технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки в державах-членах НАТО. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 2021. № 2(8), С. 101-111. <https://doi.org/10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.11>.

6. Дачковський В.О., Копашинський С.А., Овчаренко І.В. та ін. Основи оцінювання ефективності функціонування системи логістики : навч. посіб. – Київ: НУОУ, 2025.

7. Біліченко В.В., Крещенецький В.Л., Романюк С.О., Смирнов Є.В. **Виробничо-технічна база підприємства** автомобільного транспорту: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2013.

8. Сідашенко О.І. та ін. Ремонт машин та обладнання: підручник. Київ: Агроосвіта, 2014.

9. Теоретичні основи МТЗ військ (сил): навчальний посібник. Київ: МОУ ЦНДІ ЗСУ, 2014.

10. Énio Chambell, Paula Gonçalves and Luis Andrade Ferreira. Reliability-based maintenance strategy for a military weapon system – a case study. International Journal of Industrial Engineering, 30(1), 105-120, 2023.

11. Tomasz Smal, Maciej Szukalski. Nature and principles of maintenance system during combat operations. Journal of Science of the Gen. Tadeusz Kosciuszko Military Academy of Land Forces. 2013. №168 (2), P. 83-93. <https://doi.org/10.5604/1731-8157.1115445>.

12. Швець Ф.Д. Основи наукових досліджень. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013.

13. Allied Joint Publication-4, Allied Joint Doctrine for Sustainment of Operations (Edition C Version 1), 2025, 91 p.

14. Доктрина Об'єднана логістика: ВКП 4-00(01).01. №2861/НВГШ від 24 вересня 2020 року. Київ : ГШ ЗС України, 2020.

15. Оцінка чинників, які впливають на ефективність та якість ремонту пошкоджених зразків військової техніки в польових умовах / В.А. Сівак, Я.В. Павлов // Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ. 2024, Вип. 2(20) ISSN 2706-7386, С. 83-87. URL : <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/398>.

16. Опенько П.В., Доска О.М. та інші. Напрямки удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних засобів новітніх зенітних ракетних комплексів. Повітряна міць України. Київ: НУОУ, 2025. №1(8). С.76-83.

17. Глоба О.В., Мельниченко В.С. Рекомендації щодо підвищення ефективності відновлення озброєння та військової техніки утруповання зенітних ракетних військ. Повітряна міць України. Київ: НУОУ, 2024. №2(7). С.87-95.

18. Попов С.Е., Пуховий О.В., Юфа Є.А. Визначення сукупності показників для оцінювання ефективності функціонування системи управління утруповання радіотехнічних військ Повітряна Міць України. К. : НУОУ. 2024. №2(7). С. 11-17.

19. Модель оцінювання ефективності підрозділів протиповітряної оборони / Коваленко С.П. [та ін.] // Сучасні інформаційні системи. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 21-28. URL : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.03>

20. Основні положення методики оцінювання можливостей відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України, пошкоджених під час ведення бойових дій / Старцев В.В., Третяк В.Ф., Міхальова Л.В. // Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ. 2022, Вип. 3(13) ISSN 2706-7386, С. 110-120. URL : <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/219/212>

21. Смирнов Є.В., Біліченко В.В., Романюк С.О. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Виробничо-технічна база підприємств автомобільного транспорту” за напрямком “Проектування автотранспортних підприємств” для студентів всіх форм навчання спеціальності 7(8).07010601 – “Автомобілі та автомобільне господарство”. Вінниця : ВНТУ, 2013. 119 с.

Ihor Hromovyi

<https://orcid.org/0009-0009-6340-9800>

Bohdan Shkurat (Doctor of Philosophy)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Pavlo Drannyk (Candidate of military sciences, senior research scientist)

<https://orcid.org/0000-0002-6073-2962>

The National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

IMPROVED METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF ARMAMENT AND MILITARY EQUIPMENT REPAIR IN ANTI-AIRCRAFT MISSILE FORCES

Repair of air defense equipment and systems is an integral part of modern military operations. The continuous development of weapons, improvements in their design, operational conditions, and the high dynamics of the situation require personnel to quickly and reasonably select methods for restoring equipment combat readiness. Insufficient effectiveness of such measures can lead to a reduction in the combat capabilities of air defense units. To compare repair approaches, models for evaluating their effectiveness are necessary; however, existing methods do not adequately consider the complexity of the technical support system, the modern structure of repair and restoration bodies, and the specifics of combat conditions.

The purpose of the study is to improve the methodology for assessing the effectiveness of air defense equipment repair based on a systematic consideration of initial data and situational factors. System analysis, generalization, mathematical modeling, and expert assessment methods were used. The developed methodology

increases estimation accuracy and enables prediction of repair effectiveness and quality under real conditions. The results may be useful to personnel organizing repair processes and researchers studying technical support and weapon restoration issues.

Keywords: effectiveness assessment, repair effectiveness, methodology for assessment of the effectiveness, average repair time, integral indicator.

References

1. Zastosuvannia syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini:dosvid, uroky, rekomendatsii (liutyi 2022 roku – lypen 2023 roku): navch. posib. / M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, V. P. Bryntseva. Kyiv : NUOU, 2024. 96 s.
2. Zastosuvannia syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini:dosvid, uroky, rekomendatsii (serpen – hruden 2023 roku): navch. posib. / B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, V. P. Bryntseva. Kyiv : NUOU, 2024. 103 s.
3. Upravlinnia nadiinistiu. Chastyna 3-12. Posibnyk iz zastosuvannia. Intehrovana lohystychna pidtrymka. DSTU EN 60300-3-12:2022 (EN 60300-3-12:2011, IDT; IEC 60300-3-12:2011, IDT). DP “UkrNDNTs”, Kyiv, 2022.
4. NATO Science & Technology Organization. 2022 Highlights, 2022. – 76 p. Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. URL: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/230327-NATO-STO-Highlights.pdf.
5. P. V. Openko, V. V. Polishchuk, A. H. Kozyr, M. Yu. Myroniuk. Dosvid zastosuvania adaptivnykh stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki v derzhavakh-chlenakh NATO. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki, 2021. № 2(8), S. 101-111. <https://doi.org/10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.11>.
6. Dachkovskiy V.O., Kopashynskiy S.A., Ovcharenko I.V. ta in. Osnovy otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia systemy lohistyky : navch. posib. Kyiv: NUOU, 2025.
7. Bilichenko V.V., Kreshchenetskyi V.L., Romaniuk S.O., Smyrnov Ye.V. Vyrobycho-tekhnichna baza pidpriemstva avtomobilnoho transportu: navchalnyi posibnyk. – Vinnytsia: VNTU, 2013.
8. Sidashenko O.I. ta in. Remont mashyn ta obladnannia: pidruchnyk. Kyiv: Ahroosvita, 2014.
9. Teoretychni osnovy MTZ viisk (syl): navchalnyi posibnyk. – Kyiv: MOU TsNDI ZSU, 2014.
10. Énio Chambell, Paula Gonçalves and Luis Andrade Ferreira. Reliability-based maintenance strategy for a military weapon system – a case study. International Journal of Industrial Engineering, 30(1), 105-120, 2023.
11. Tomasz Smal, Maciej Szukalski. Nature and principles of maintenance system during combat operations. Journal of Science of the Gen. Tadeusz Kosciuszko Military Academy of Land Forces. 2013. №168 (2), P. 83-93. <https://doi.org/10.5604/1731-8157.1115445>.
12. Shvets F.D. Osnovy naukovykh doslidzhen. Navchalnyi posibnyk. – Rivne. NUVHP, 2013.
13. Doktryna Ob'iednana lohistyka: VKP 4-00(01).01. №2861/NVHSh vid 24 veresnia 2020 roku. Kyiv : HSh ZS Ukrainy, 2020.
14. Otsinka chynnykiv, yaki vplyvaiut na efektyvnist ta yakist remontu poshkodzhennykh zrazkiv viiskovoi tekhniki v polovykh umovakh / V.A. Sivak, Ya.V. Pavlov // Zbirnyk naukovykh prats DNDI VS OVT. 2024, Vyp. 2(20) ISSN 2706-7386, S. 83-87. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/398>
15. Openko P.V., Doska O.M. ta inshi. Napriamky udoskonalennia systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu radioelektronnykh zasobiv novitnykh zenitnykh raketnykh kompleksiv. Povitriana mits Ukrainy. Kyiv: NUOU, 2025. №1(8). S.76-83.
16. Hloba. O.V., Melnychenko V.S. Rekomendatsii shchodo pidvyshchennia efektyvnosti vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki uhrupovannia zenitnykh raketnykh viisk. Povitriana mits Ukrainy. Kyiv: NUOU, 2024. №2(7). S.87-95.
17. Popov S.E., Pukhovyi O.V., Yufa Ye.A. Vyznachennia sukupnosti pokaznykiv dlia otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia systemy upravlinnia uhrupovannia radiotekhnichnykh viisk Povitriana Mits Ukrainy. K. : NUOU. 2024. №2(7). S. 11-17.
18. Model otsiniuvannia efektyvnosti pidrozdiliv protypovitrianoi oborony / Kovalenko S.P. [ta in.] // Suchasni informatsiini systemy. 2021. T. 5, № 2. S. 21-28. URL : <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.03>
19. Osnovni polozhennia metodyky otsiniuvannia mozhlyvostei vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy, poshkodzhennykh pid chas vedennia boiovykh dii / Startsev V.V., Tretiak V.F., Mikhalova L.V. // Zbirnyk naukovykh prats DNDI VS OVT. – 2022, Vyp. 3(13) ISSN 2706-7386, S. 110-120. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/219/212>.
20. Smyrnov Ye.V., Bilichenko V.V., Romaniuk S.O. Metodychni vkazivky do vykonannia kursovoho proektu z dystsypliny “Vyrobycho-tekhnichna baza pidpriemstv avtomobilnoho transportu” za napriamkom “Proektuvannia avtotransportnykh pidpriemstv” dlia studentiv vsikh form navchannia spetsialnosti 7(8).07010601 – “Avtomobili ta avtomobilne hospodarstvo”. Vinnytsia : VNTU, 2013. 119 s.

Сапічев Микола Миколайович

<https://orcid.org/0009-0002-8211-8901>

Шкурят Богдан Жоржович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Резнік Дмитро Вікторович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-3980-923X>

Мильников Геннадій Васильович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0009-0000-9333-4349>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБАМИ УРАЖЕННЯ ПІДРОЗДІЛІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Забезпечення засобами ураження сил і засобів протиповітряної оборони є невід'ємною складовою логістики сучасних бойових дій. Досвід війни засвідчив, що чинні схеми постачання засобів ураження не завжди забезпечують необхідну оперативність і стійкість логістичних ланцюгів, особливо в умовах інтенсивного вогневого впливу противника та динамічної зміни обстановки. Це виявило обмежену ефективність традиційних підходів до організації доставки засобів ураження в сучасних умовах.

Метою дослідження є визначення шляхів удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження за рахунок комбінованого використання наявних підходів до оптимізації доставки.

У статті запропоновано комбінований підхід до організації доставки засобів ураження, який поєднує елементи класичної транспортної задачі та мережесих моделей маршрутизації з розподілом функцій між стратегічним, оперативним і тактичним рівнями. Для досягнення мети дослідження застосовано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів: системний аналіз, узагальнення, методи розв'язання транспортної задачі. Моделювання двох варіантів постачання – прямої доставки та комбінованого – показало переваги останнього у забезпеченні більшої гнучкості, стійкості логістичного ланцюга та можливості оперативного перепланування порівняно з класичною схемою постачання.

Результати дослідження можуть бути використані органами управління логістичним забезпеченням для планування доставки засобів ураження та інших матеріально-технічних ресурсів в умовах динамічних бойових дій. Стаття також буде корисною для фахівців з військової логістики, дослідників у галузі прикладної оптимізації та розробників автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері логістики.

Ключові слова: логістичне забезпечення, ефективність забезпечення, засоби ураження, комбінована транспортна задача.

Вступ

У сучасних збройних конфліктах зростання ефективності бойового застосування сил і засобів ППО безпосередньо залежить від їхнього своєчасного та комплексного логістичного забезпечення, зокрема забезпечення засобами ураження (ЗУ). Неповне та несвочасне поповнення їх запасів призводить до зниження боєздатності підрозділів і зриву виконання бойових завдань. Тому планування логістичного забезпечення в умовах ведення бойових дій має спиратися на кількісні методи аналізу та моделювання, що забезпечують обґрунтоване прийняття рішень щодо розміщення сил і засобів, маршрутів підвезення та організації місць зосередження і складів. Нормативні документи Збройних Сил України [1-3] та НАТО [4, 5] підкреслюють необхідність підтримання працездатності логістичної системи як у мирний час, так і в особливий період, а також важливість готовності транспортних і ремонтно-відновлювальних підрозділів до дій у зоні ураження противника. Практична реалізація цього вимагає

уніфікації маршрутів, створення та підтримання пунктів накопичення (хабів, складів, арсеналів), а також налагодження процедур доставки матеріальних засобів, зокрема, засобів ураження, що, за досвідом бойових дій, не завжди реалізовувалося в повній мірі та призводило до зниження ефективності доставки матеріально-технічних засобів, зокрема засобів ураження [6-9]. Додатково, чинні керівні документи підкреслюють пріоритетність безперебійної доставки засобів ураження до підрозділів ППО, що підтверджує актуальність дослідження напрямів удосконалення логістичного забезпечення підрозділів ППО у сучасних умовах війни [10, 11].

Завдання підвищення ефективності логістичного забезпечення сил ППО нерозривно пов'язане з оптимізацією транспортних процесів. Але традиційні методики планування доставки матеріально-технічних засобів у військовій логістиці [11-14] не в повній мірі враховують багаторівневу природу логістичної мережі, високу динамічність бойової обстановки, стохастичність

ризиків і можливість оперативного переспрямування маршрутів. У той же час цивільна логістика застосовує ефективні алгоритми та практики (hub-and-spoke архітектури, евристичні й метаевристичні підходи до VRP/TSP, ре-тайм оптимізацію маршрутів і методи стійкості ланцюгів) [15-21], які здатні компенсувати ці недоліки.

розв'язання транспортних задач та визначення їх потенціалу щодо підвищення ефективності забезпечення засобами ураження підрозділів ППО. На основі результатів аналізу розроблено комбінований підхід до організації доставки засобів ураження. Запропонований підхід апробовано шляхом сценарного моделювання порівняльних схем постачання; апробація включатиме оцінку часових показників доставки, витрат пального та показників стійкості логістичних потоків. На підставі отриманих результатів сформульовані загальні рекомендації підвищення ефективності забезпечення засобами ураження підрозділів ППО.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що принципи і моделі розв'язання транспортних задач, які успішно використовуються в цивільній логістиці, можуть бути адаптовані для військових умов з урахуванням обмежень бойової обстановки, ризиків маршруту, вимог до живучості та часових інтервалів доставки.

При цьому основними припущеннями та обмеженнями дослідження вважатимуться:

мережа доставки засобів ураження поділяється на три рівні: стратегічний (до найбільш безпечних пунктів перевантаження), оперативний (поблизу та в межах операційної зони) та тактичний (для доставки засобів ураження вогнеvim підрозділам);

залізничний спосіб доставки застосовується тільки за умови забезпечення безпеки інфраструктури та логістичних процесів;

складні за вмістом вантажі (засоби ураження до різних ЗРК) розглядаються у спрощеному вигляді та мають однакову пріоритетність;

додаткові витрати часу/ресурсів на супроводження вантажів вважаються як фіксовані надбавки у часі/витратах для певних маршрутів у відповідних сценаріях;

укомплектованість особовим складом, засобами доставки та перевантаження, їх готовність, дозволяють виконувати всі операції із забезпечення засобами ураження в межах нормативів;

аналіз проводиться за набором детермінованих сценаріїв; повністю стохастична оптимізація не реалізується в базовій версії, але передбачена як можливе розширення.

оперативні дані щодо стану інфраструктури та доріг доступні в агрегованому вигляді або з затримкою.

Матеріали та методи

Для досягнення мети дослідження застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів: системний аналіз, синтез, порівняння та узагальнення [19, 20]. Матеріальну базу становили нормативно-методичні документи міністерства оборони та Збройних Сил України та навчально-методичні посібники [1-5, 10-13], а також емпіричні дані щодо практики забезпечення підрозділів ППО

Метою дослідження є визначення шляхів удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження за рахунок комбінованого використання наявних підходів до оптимізації доставки.

Основні завдання дослідження полягають у проведенні системного аналізу сучасних методів

у ході російсько-української війни (фактичні показники часу доставки, витрат пального, інтенсивності використання транспорту), узагальнення досвіду цивільних логістичних операторів [6-9, 16-19].

Методологічно дослідження поєднує аналіз практики й математичне моделювання. На стратегічному рівні використано класичну транспортну задачу для планування великих партій; на оперативному – моделі VRP/MDVRP для маршрутизації з урахуванням хабів; на тактичному – задачі маршрутизації останньої милі (TSP/VRP з часовими вікнами). Для порівняння підходів проаналізовано класичні алгоритми (методи “північно-західного кута”, мінімальної вартості, MODI) та сучасні евристичні/метаевристичні методи (2-opt, 3-opt, LNS, генетичні алгоритми) [13-15, 20, 23].

Практична частина включала побудову комбінованої математичної постановки транспортної задачі та її розв'язання з використанням точних методів на стратегічних підзадачах і евристик на великомасштабних інстанціях. Для кількісної оцінки виконано сценарне моделювання двох варіантів: “базовий” (пряма доставка) та “хаб-сценарій” (через пункти накопичення). Оцінювані показники: середній час доставки, сумарні перевізні витрати, кількість рейсів, витрати пального та стійкість логістичних потоків. Сценарне моделювання застосовано для первинного оцінювання адекватності запропонованого підходу до доставки ЗУ. Додатково враховано фіксовані надбавки часу/витрат для супроводження на відповідних маршрутах.

Результати аналізу та моделювання використані для формулювання запропонованої комбінованої транспортної задачі і обґрунтування практичних рекомендацій щодо організації хабів, оптимізації маршрутів та планування резервних шляхів.

Результати

Досвід бойових дій підтверджує, що маршрути доставки засобів ураження (ЗУ) є пріоритетними цілями для ураження противником, що призводить до втрат та зниження ефективності логістичного забезпечення підрозділів ППО. Для підвищення ефективності та безпеки постачання ЗУ критично необхідним є вдосконалення логістичної системи через впровадження організаційно-технічних заходів.

З цієї метою було проведено аналіз існуючих підходів до оптимізації поставок, серед яких ключове місце займає транспортна Задача (ТЗ), що є базовою моделлю в дослідженні операцій та логістиці. ТЗ дозволяє мінімізувати витрати перевезень, оптимізувати маршрути та раціонально розподіляти ресурси.

Аналіз методів розв'язання транспортної задачі

Класична ТЗ спрямована на пошук найвигіднішого плану перевезення однорідного продукту від m постачальників до n споживачів за критерієм найменшої вартості перевезення [13-15]. До її переваг слід віднести: простоту математичної постановки, наявність ефективних алгоритмів точного розв'язання (наприклад, Метод потенціалів). Вказана задача доцільна для глобального планування розподілу великих партій ЗУ між основними логістичними хабами ППО. Поряд з тим, класична ТЗ не враховує послідовність об'їзду проміжних пунктів та обмеження ємності транспортних засобів.

Задача комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) є класичною комбінаторною задачею оптимізації, де потрібно знайти найкоротший маршрут, що проходить через усі n міст рівно один раз і повертається у вихідну точку. Але не існує алгоритму, який би точно розв'язував її для великих n . Розрізняють симетричну, асиметричну та метричну TSP. Практична значущість задачі величезна – від оптимізації логістичних маршрутів до складання розкладів. Для оцінки якості наближених рішень застосовуються нижні межі, зокрема оцінка Гельда – Карпа, що ґрунтується на побудові так званого 1-дерева. У науковій літературі доведено, що навіть для $n=50$ споживачів точне розв'язання задачі вимагає значних обчислювальних ресурсів [12-15]. Отже, до її переваг відноситься можливість її застосування для коротких маршрутів, і навпаки, для довгих маршрутів з великою кількістю споживачів вона не дуже придатна.

Задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) є узагальненням TSP. У ній необхідно скласти оптимальні маршрути для кількох транспортних засобів, які виходять із одного або кількох депо та обслуговують множину клієнтів. Основні варіанти VRP включають:

CVRP (Capacitated VRP) – з обмеженням на вантажопідйомність машин;

VRPTW (VRP with Time Windows) – з часовими вікнами для відвідування клієнтів;

MDVRP (Multi-Depot VRP) – з кількома хабами.

Ці задачі відображають реальні умови роботи логістичних компаній, таких як “Нова пошта” чи “Rapid”.

Задача VRP забезпечує максимально реалістичне моделювання логістики в умовах обмежень, але значна обчислювальна складність вимагає застосування евристичних методів (генетичні алгоритми, мурашині алгоритми).

У сучасних транспортних задачах враховуються стохастичні фактори – випадкові зміни попиту, затори на дорогах, погодні умови, аварії. Тому будуються стохастичні моделі, де параметри мають імовірнісний характер. Крім того, все частіше використовують багатокритеріальні постановки: мінімізація не лише витрат, але й часу доставки, викидів CO₂, ризиків безпеки. Це робить моделі

більш реалістичними, але й значно складнішими для розв'язання.

До найбільш поширених методів розв'язання ТЗ відносяться метод північно-західного кута, метод мінімальної вартості, евристичні (2-орт, 3-орт) та метаевристичні (генетичні алгоритми, мурашині колонії) методи для TSP/VRP. Метод північно-західного кута придатний для формування початкового плану, але має низьку точність (далекій від оптимального). Метод мінімальної вартості дає план ближчий до оптимального, зменшуючи кількість ітерацій. Евристичні та метаевристичні методи дозволяють знаходити якісні рішення для великих, складних задач (тисячі пунктів) за прийнятний час, що є ключовим для реальної військової логістики, проте ці методи не використовуються на практиці у військах.

Поряд з цим, на прикладі чотирьох великих логістичних компаній (таблиця 1) можна простежити практичне застосування як класичних, так і сучасних методів оптимізації перевезень [16-19]. В Україні компанії “Нова пошта” та “Rapid” активно впроваджують моделі VRP і TSP для організації кур'єрської доставки. “Укрзалізниця” використовує класичну транспортну задачу для планування маршрутів та розподілу вантажопотоків, тоді як міжнародна компанія “Maersk” застосовує глобальні мережеві моделі для оптимізації процесів морських перевезень і міжнародної торгівлі.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз практичних реалізацій транспортних задач

Компанія	Теоретична модель	Методи розв'язання	Практичне застосування
Нова пошта	TSP, VRP	Жадібні алгоритми, 2-орт, 3-орт	Оптимізація кур'єрських маршрутів у містах
Укрзалізниця	Класична транспортна задача	Метод потенціалів, мережеве програмування	Оптимальний розподіл вантажів
Rapid	TSP з часовими вікнами	Евристики, прогнознi алгоритми	Доставка клієнтам у часових проміжках
Maersk	Глобальна транспортна задача	Стохастичні моделі, евристики	Оптимізація морських контейнерних маршрутів

Отже, для підвищення ефективності забезпечення ЗУ підрозділів ППО доцільне використання комбінованого підходу, а саме:

класична ТЗ (метод потенціалів/мережеве програмування) більш придатна для стратегічного та тактичного розподілу великих обсягів ЗУ між основними складами;

VRP/TSP (евристичні, метаевристичні методи) доцільні для оперативного планування маршрутів “останньої милі” (тактичного рівня) з урахуванням часових вікон, вантажопідйомності та стохастичних

факторів (затори, ризики), що забезпечує швидкість, мінімізацію ризиків та ресурсів.

Практичне застосування цих моделей великими логістичними компаніями (“Нова пошта”, “Maersk”) підтверджує їхню високу ефективність та адаптивність до складних реальних умов, що повністю обґрунтовує їхнє використання у військовій логістиці.

Удосконалення забезпечення засобами ураження угруповань, частин, підрозділів ППО

Ключовими напрямками для удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження на основі використання досвіду логістичних компаній є: створення мережі локальних хабів-накопичувачів; запровадження багаторівневої комбінованої транспортної моделі з узгодженням стратегічного, оперативного та тактичного рівнів перевезень; організація управління й моніторингу маршрутами у режимі реального часу; уніфікація процедур приймання та контролю якості постачання; підвищення кваліфікації персоналу; застосування прогнозного планування запасів та оптимізація використання транспортних і паливних ресурсів.

Розвиток системи резервних маршрутів і цифровізація обліку підвищують стійкість логістичних потоків і керованість процесів постачання. Реалізація вказаних заходів створює необхідну методологічну та організаційну базу для подальших кількісних розрахунків і моделювання ефективності функціонування удосконаленої системи забезпечення засобами ураження сил і засобів ППО [12-14].

Для кількісного підтвердження ефективності вдосконаленої системи та обґрунтування її практичного застосування було виконано моделювання процесу доставки ЗУ.

З цією метою визначено вихідні дані, до яких належать відстані між пунктами постачання, середні швидкості руху, тривалості привалів, вантажомісткість транспортних засобів, добовий попит у засобах ураження та потрібні витрати пального. Подальші розрахунки виконуються для двох сценаріїв – базового (пряма доставка) та хаб-сценарію (з використанням проміжних пунктів накопичення), що дозволяє кількісно порівняти вплив кожного з них на загальну ефективність забезпечення засобами ураження. При цьому під хабом розуміється локальний пункт у межах 100 км від м. Дніпро, розташований перед містом (тобто відстань до хабу скорочується до 100 км (для розрахунків прийнята максимальна різниця відстані), кожен хаб може накопичувати до 10 ракет.

Час доставки ЗУ згідно обраного маршруту (сценарію) знаходиться за формулою:

$$t_f = \frac{D_f}{V_{road}} + t_{pr} \quad (1)$$

де t_f – час доставки ЗУ згідно обраного маршруту;
 D_f – протяжність обраного маршруту

доставки ЗУ;

V_{road} – середня швидкість руху засобів транспортування ЗУ;

t_{pr} – середній час на привали (зупинки).

Обидва сценарії постачання починаються в місті Львів (припускається, що ЗУ вже прибули на Львівський вузол) (рис. 1). На рисунку 2 відображено маршрут доставки ЗУ автомобільним транспортом з метою забезпечення угруповань та підрозділів ППО з використанням запропонованого комбінованого підходу (хаби 1,5,8 – основні для прийому та подальшого розподілу ЗУ).

“Базовий сценарій” доставки ЗУ згідно обраного маршруту розраховується за формулою:

$$t_{base} = \sum_{k=1}^K t_k + t_{local} \quad (2)$$

де t_{base} – базовий повний час доставки ЗУ згідно обраного маршруту;

$\sum_{k=1}^K t_k$ – час подолання окремих ділянок маршруту;

t_{local} – час на локальну доставку в заданих межах позиційного району.

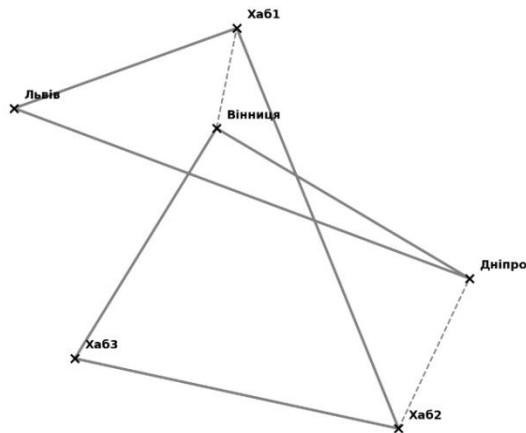


Рисунок 1 – Схема пошуку рішень для доставки засобів ураження



Рисунок 2 – Приклад розрахованого маршруту доставки ЗУ згідно “Хаб сценарію” з 10 хабами

“Хаб сценарій” доставки ЗУ згідно обраного маршруту розраховується за формулою:

$$t_{hub} = \sum_{k=1}^K t_k + \sum_{h=1}^H t_h + t_{local} \quad (3)$$

де t_{hub} – час доставки ЗУ згідно обраного маршруту з використанням хабів;
 $\sum_{k=1}^K t_k$ – час подолання окремих ділянок маршруту від хабу до підрозділу;
 $\sum_{h=1}^H t_h$ – час подолання окремих ділянок маршруту від хабу до хабу.

Різниця часу доставки ЗУ між обраними сценаріями визначається за виразом:

$$t_{lead} = t_{base} - t_{hub} \quad (4)$$

Згідно вихідних даних, наведених в таблиці 2, отримано наступні часові показники:

1) “Базовий сценарій”:

$t_1 = 11,00$ год.

$t_2 = 16,06$ год.

Використовуючи формулу (2) та дані з табл. 4, отримано:

$t_{base} = 29,06$ год.

2) “Хаб сценарій” (t_{hub}):

$t_3 = 12,06$ год.

$t_{hub} = 25,06$ год.

За виразом (4) отримано значення різниці між сценаріями: $t_{lead} = 4,00$ год.

За результатами сценарного моделювання, доставка засобів ураження на позиції підрозділу із використанням проміжних хабів скорочує час рейсу приблизно на 4 години ($\approx 14\%$) порівняно з прямою схемою постачання. Подальше збільшення обсягів перевезень може забезпечити додатковий вииграш у часі за рахунок локального накопичення запасів на хабах та реалізації паралельних процесів доставки між ними і в межах позиційного району.

Таблиця 2

Результати розрахунків часу перевезення засобів ураження

№ з/п	Маршрут доставки	D (км)	t ₁ (год.)	t ₂ (год.)	t ₃ (год.)	t _{base} (год.)	t _{hub} (год.)	t _{lead} (год.)	t _{local} (год.)	t _{pr} (год.)	V _{road} (год.)
1.	Ділянка маршруту Львів – Вінниця, D ₁	350	11,00	-	-	-	-	-	2	4	50
2.	Ділянка маршруту Вінниця - Дніпро, D ₂	503	-	16,06	-	-	-	-	2	6	50
3.	Ділянка маршруту Вінниця – Дніпро з хабом, D ₃	403	-	-	12,06	-	-	-	2	4	50
4.	Базовий маршрут Львів - Дніпро	-	-	-	-	29,1	-	4,00	-	-	-
5.	Маршрут Львів – Дніпро з хабом	-	-	-	-	-	25,06		-	-	-

Наступним кроком доцільно розглянути витрату пального згідно обраних сценаріїв доставки ЗУ, яка в загальному випадку визначається для одного транспортного засобу за виразом:

$$q_k = \frac{D_k \cdot (Q + Cor)}{100} \quad (5)$$

де q_k – витрата пального на вибраній ділянці маршруту ЗУ k ;

D_k – протяжність k -ї ділянки маршруту доставки ЗУ;

Q – середня витрата палива на 100км шляху транспортного засобу (згідно керівних документів або технічної документації).

Cor – коефіцієнт згідно норм для автомобілів з причепами, що виконує роботу, яка обчислюється в тонно-кілометрах (на 100км шляху збільшується на 1,3 л. на тонну вантажу).

Витрата пального для доставки ЗУ за “базовим сценарієм” згідно обраного маршруту руху транспортним засобом розраховується за формулою:

$$q_{base} = \sum_{k=1}^K q_k + q_{local} \quad (6)$$

де $\sum_{k=1}^K q_k$ – витрата пального для подолання окремих ділянок маршруту;
 q_{local} – витрата пального на локальну (Last-mile) доставку ЗУ.

Витрата пального для доставки ЗУ згідно обраного маршруту руху транспортним засобом з використанням “Хаб сценарію”:

$$q_{hub} = \sum_{k=1}^K q_k + \sum_{h=1}^H q_h + q_{local} \quad (7)$$

де $\sum_{h=1}^H q_h$ – витрата пального на один рейс від хабу до хабу;

Різниця витрати палива для доставки ЗУ між обраними сценаріями визначається за формулою:

$$q_{lead} = q_{base} - q_{hub} \quad (8)$$

Отже, маючи з табл. 3 такі вихідні дані, як відстань між ділянками маршруту, витрата пального на локальну доставку ЗУ, середня витрату пального на 100 км маршруту, з використанням виразу (5), визначається витрата пального для перевезення ЗУ згідно обраного сценарію:

$q_1 = 252,00$ л;

$q_2 = 362.16$ л.

$q_3 = 290.16$ л.

За допомогою формул (6),(7) визначається потреба пального для одного транспортного засобу згідно обраного сценарію рейсу:

1) “Базовий сценарій”: $q_{base} = 614.16$ л;

2) “Хаб сценарій”: $q_{hub} = 578.16$ л.

Використовуючи формулу (8) обчислюємо різницю витрати пального для доставки ЗУ між обраними сценаріями: $q_{lead} = 36.00$ л.

Економія = 324.00 л/добу (5.86%).

Для забезпечення 3 підрозділів по 12 ЗУ на добу необхідно здійснити 9 рейсів, для яких:

$q_{base} = 5527.44$ л/добу;

$q_{hub} = 5203.44$ л/добу.

Примітка:

1) Ємність авто: 4 ЗУ/авто (для розрахунків). Тоді потрібно 9 рейсів/добу для доставки 36 ракет;

2) Концепція хабів: хаб — локальний пункт у межах 100 км від м.Дніпро, кожен хаб може накопичувати 10 ЗУ.

Таблиця 3

Результати розрахунків потреби в ресурсах на перевезення засобів ураження

№ з/п	Маршрут доставки	D (км)	q_1 (л.)	q_2 (л.)	q_3 (л.)	q_4 (л.)	q_{base} (л.)	q_{hub} (л.)	q_{lead} (л.)	q_{local} (л.)	$Q + k$ (л.)
1.	Ділянка маршруту Львів – Вінниця, D1	350	252	-	-	-	-	-	-	36	72
2.	Ділянка маршруту Вінниця - Дніпро, D2	503	-	362	-	-	-	-	-	36	72
3.	Ділянка маршруту Вінниця – Дніпро з хабом, D3	403	-	-	-	-	-	-	-	36	72
4.	Локальна доставка, D4	50	-	-	-	36	-	-	-	36	72
5.	Базовий маршрут Львів - Дніпро	-	-	-	-	-	614	-	36	36	72
6.	Маршрут Львів – Дніпро з хабом	-	-	-	-	-	-	578		36	72

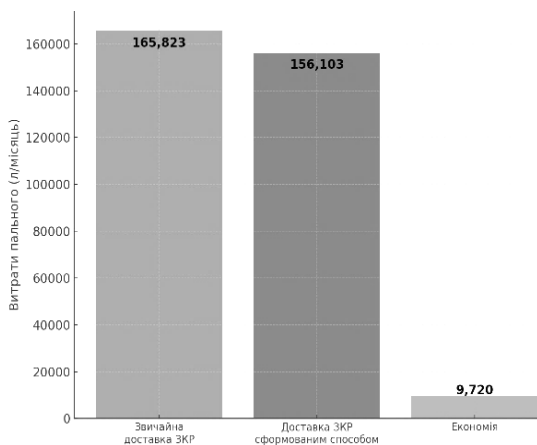


Рисунок 3 – Порівняння витрат пального при використанні “Базового сценарію” та “Хаб сценарію”

В результаті: доставка ЗУ на позицію одного підрозділу зі створенням хабів за прикладом компанії “Нова пошта” з метою зменшення часу на доставку, а також за прикладом маршрутизації компанії “Rapid” через створені хаби дають економію пального $\approx 5\text{--}6\%$ для угруповання ППО, що в перспективі (з урахуванням кількості транспортних засобів та тривалості операції) дасть значну економію ресурсів. На рис. 3 показана економія пального на доставку ЗУ для угруповання ППО на 1 місяць бойових дій при використанні “Базового сценарію” та “Хаб сценарію” за умови повного поповнення боекомплектів 1 раз на 5 днів.

Комбінований підхід до організації доставки засобів ураження

Забезпечення підрозділів ППО засобами ураження вимагає комплексного підходу до

транспортного планування. Кожен етап переміщення – від стратегічних залізничних перевезень до маршів своїм ходом і доставки до позиційних районів або місць розосередження — потребує використання різних моделей та методів оптимізації. На основі аналізу практики провідних логістичних компаній (таблиця 1) можна сформулювати наступні рекомендації для підвищення ефективності військової логістики підрозділів ППО (табл. 3).

Для перевезення великих партій ЗУ, боєприпасів і технічного майна доцільно застосовувати класичну транспортну задачу з використанням методу мінімальної вартості для формування початкового плану і методу потенціалів (MODI) для досягнення оптимального розподілу потоків доцільно використовувати залізничні перевезення. Згадані методи дозволяють скорочувати час очікування на станціях, ефективно розподіляти ресурси та зменшувати затримки при завантаженні/вивантаженні. Приклад з практики “Maersk” та “Укрзалізниця” демонструє, як багатокритеріальні моделі допомагають враховувати не лише час і вартість, а й ризики, пов’язані з маршрутом (табл. 4).

Під час маршу підрозділів своїм ходом доцільніше використовувати моделі VRP (Vehicle Routing Problem) і MDVRP (Multi-Depot VRP) з часовими вікнами. Вони враховують реалії пересування у колоні: різні швидкості вдень і вночі, дистанції між машинами, часи привалів та необхідність розосередження. Жадібні алгоритми дозволяють швидко сформувати базовий план, тоді як локальні методи оптимізації (2-opt, 3-opt) скорочують час маршів на 10-15% [24].

Подібні принципи успішно використовує компанія “Нова пошта” у міській логістиці, застосовуючи автоматизовані системи планування маршрутів та GPS-моніторинг (табл. 3).

Для доставки безпосередньо в позиційні райони ефективними є моделі TSP (Traveling Salesman Problem) з часовими вікнами. Такі задачі допомагають оптимізувати підвезення боєприпасів

та засобів ураження безпосередньо до підрозділів у стислі терміни.

Жадібні алгоритми забезпечують швидке рішення, а алгоритм Кристофідеса або локальні методи (2-opt) гарантують близькість результату до оптимального. Компанія Rapid є прикладом застосування подібних моделей, успішно організовуючи доставку в умовах обмежених часових вікон (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльна таблиця доцільності застосування методів перевезення

Рівень перевезень, умови	Засоби та способи доставки	Метод вирішення ТЗ	Приклад організації, де застосовано	Очікуваний ефект
Стратегічний рівень	Залізниця (масові перевезення)	Мінімальна вартість + потенціали	Maersk, Укрзалізниця	Скорочення затримок, оптимізація ешелонів, зменшення часу очікування
Оперативний рівень	Автотранспорт (колонами)	VRP/MDVRP + 2-opt/3-opt	Нова пошта	–10–15% часу маршів
Тактичний рівень	Автотранспорт (розосереджено)	TSP + жадібний + 2-opt/Кристофідес	Rapid	Оперативність і точність дозавантаження в позиційних районах
Динамічна бойова обстановка	Комбінована доставка	Детальне планування, резервні маршрути	Maersk	Стійкість логістики, зменшення уразливості

Оптимізувати доставку засобів ураження можна за рахунок комбінування методів на різних рівнях системи доставки. На стратегічному рівні залізничні перевезення оптимізуються за допомогою класичної транспортної задачі. На оперативному рівні маршрути маршу своїм ходом плануються з використанням VRP/MDVRP. На тактичному рівні для доставки в позиційні райони чи місця розосередження застосовується TSP. Важливим елементом є завчасне і детальне планування: передбачення резервних маршрутів, часових графіків і сценаріїв реагування на зміни обстановки. Приклади подібної інтеграції демонструють компанії: “Maersk” (глобальне планування), “Укрзалізниця” (мережеве управління), “Нова пошта” (оперативне перепланування) та “Rapid” (доставка з часовими вікнами (табл. 4).

Таким чином, практичне застосування комбінованого підходу, що сформований на основі різних методів вирішення транспортної задачі, забезпечить удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження в умовах ведення бойових дій.

Обговорення

Проведене дослідження доводить, що використання комбінованих транспортних задач для логістичного забезпечення угруповання ППО є ефективним інструментом підвищення швидкості та надійності доставки засобів ураження. Отримані результати показали, що впровадження “хаб-сценарію”, побудованого за аналогією з цивільними логістичними системами (“Нова пошта”, “Rapid”), забезпечує скорочення часу доставки приблизно на 14% та економію пального до 6%.

Отримані значення підтверджують практичну доцільність адаптації цивільних логістичних

принципів до військових умов. Використання моделей VRP, TSP, MDVRP у поєднанні з класичними методами транспортної задачі (метод мінімальної вартості, метод потенціалів) дозволяє інтегрувати планування на стратегічному, оперативному та тактичному рівнях.

Порівняння отриманих у ході сценарного моделювання результатів із практикою вітчизняних та міжнародних логістичних компаній свідчить, що розроблений підхід відповідає світовим тенденціям в галузі логістики, побудови адаптивних маршрутів і оптимізації багаторівневих транспортних мереж.

В роботі проведено лише первинний аналіз адекватності запропонованого підходу, для подальшого його удосконалення доцільно врахувати стохастичні фактори (наприклад, затримки із зовнішніх причин, втрати внаслідок аварій та дій противника), а також ризики різного характеру. Отже, сформований підхід може стати основою для подальших досліджень щодо:

створення автоматизованої системи підтримки прийняття рішень при забезпеченні підрозділів ППО засобами ураження;

моделювання сценаріїв в умовах бойових втрат, зруйнованих маршрутів і часових обмежень;

розширення розрахунків з урахуванням багатокритеріальної оптимізації (час – витрати – ризики).

Висновки

На підставі проведеного дослідження обґрунтовано, що інтеграція класичних і сучасних методів вирішення транспортної задачі є перспективним напрямом підвищення ефективності забезпечення підрозділів ППО засобами ураження.

Було проаналізовано та адаптовано комбінований підхід, що поєднує рішення класичної транспортної

задачі (для стратегічного планування, наприклад, залізничних перевезень) та методів VRP/TSP (для оперативного рівня та доставки у позиційні райони)

Первинне оцінювання сформованого комбінованого підходу показало підвищення ефективності доставки ЗУ за показниками часу (на 14%) та пального (на 6%). Крім того, практична доцільність застосування наведених методів підтверджена успішною адаптацією досвіду провідних національних та міжнародних логістичних компаній, що може сприяти підвищенню стійкості системи логістичного забезпечення і зниженню ризиків зриву доставки.

Таким чином, інтеграція запропонованих рішень створює основу для більш швидкого, надійного та економічного забезпечення Повітряних Сил ЗСУ в умовах сучасних бойових дій.

Список використаних джерел

1. Доктрина з організації переміщення та перевезень (транспортувань) у Збройних Силах України ВКП 4-00(03).01 : №2464\НВГПШ від 20 серпня 2020 року. Київ: ГПШ ЗС України, 2020.
2. Доктрина застосування сил логістики ВКП 4-32(03).01 : №387\НВГПШ від 04 лютого 2021 року. Київ: ГПШ ЗС України, 2020.
3. Доктрина Об'єднана логістика: ВКП 4-00(01).01 : №2861\НВГПШ від 24 вересня 2020 року. Київ: ГПШ ЗС України, 2020.
4. AJP-4 (Allied Joint Doctrine for Logistics). Published by the NATO Standardization office (NSO), Dec. 2018.
5. AJP-4.4 (Allied Joint Doctrine for Movement). Published by the NATO Standardization office (NSO), Sep. 2022.
6. М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, та В. П. Бринцева, Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року). Київ: НУОУ, 2024.
7. Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, О. В. Глоба, та В. П. Бринцева, Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року). Київ: НУОУ, 2024.
8. Б. Ж. Шкурат, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, Ю. О. Горобець, П. А. Дранник, О. В. Глоба, та В. П. Бринцева, Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння. Київ: НУОУ, 2025.
9. Є. В. Смиченко, В. В. Поліщук, М. Ю. Миронюк, Ю. М. Коломієць, та С. М. Базіло, "Аналіз роботи органів військового управління щодо забезпечення матеріально-технічними засобами військ протягом 2020–2022 років в зоні проведення операції Об'єднаних Сил", Повітряна міць України, № 1(4), с. 58–62, 2023. DOI: 10.33099/2786-7714-2023-1-4-58-62.
10. Методичні рекомендації щодо пересування частин і підрозділів ЗРВ. ПС ЗСУ, 2020.
11. Настанова з логістичного забезпечення Збройних Сил України: Затв. наказом ГПШ ЗСУ №494 від 28.08.2019 р. 2019.
12. Теоретичні основи МТЗ військ (сил). Київ: МОУ ЦНДІ ЗСУ, 2014.
13. В. О. Дачковський, С. А. Копашинський, І. В. Овчаренко, та ін., Основи оцінювання ефективності функціонування системи логістики. Київ: НУОУ, 2025.
14. І. С. Романченко, В. О. Шуєнкін, С. С. Трегубенко, І. Ю. Марко, П. С. Закусило, та О. І. Хазанович, Розвиток теорії матеріально-технічного забезпечення військ. Київ: ЦНДІ ЗС України, 2020.
15. А. І. Козаченко, Logistics and Transport Systems. Київ: Національний авіаційний університет, 2020.
16. Nova Digital розробила RouteStripe - продукт для підвищення ефективності адресної доставки. Офіційний сайт компанії Нова Пошта. [Online]. Доступно: <https://novaposhta.ua/routestripe> (дата звернення: 25 жов. 2025).
17. Digital transformation at Maersk: the never-ending pace of change. [Online]. Доступно: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15228053.2023.2300921> (дата звернення: 25 жов. 2025).
18. Д. Д. Ковальов, "Використання генетичних алгоритмів при плануванні залізничних перевезень у міжнародному сполученні", Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, т. 29, № 1, с. 69-77, 2024. DOI: 10.18664/iksz.v29i1.300983.
19. Cargo transportation across Ukraine and Kyiv. [Online]. Доступно: <https://rapid.com.ua/en/poslugy/perevzennya-vantazhiv-po-ukraini-and-kyivi> (дата звернення: 25 жов. 2025).
20. Системний аналіз та дослідження операцій, В. Вігліньський, Ред. Київ: КНЕУ, 2018.
21. В. М. Вовк та Л. М. Зомчак, Оптимізаційні моделі економіки. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2013.
22. Ф. Д. Швець, Основи наукових досліджень. Рівне: НУВГП, 2013.
23. Metody naukovo doslidzhennya. [Online]. Доступно: <https://blog.magistr.ua/metody-naukovogo-doslidzhennya/> (дата звернення: 25 жов. 2025).
24. M.-S. Chang, S.-R. Chen, та C.-F. Hsueh, "Real-Time Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Delivery/Pickup Demands," Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, т. 5, Oct. 2003, с. 2273–2286.

Mykola Sapichev

<https://orcid.org/0009-0002-8211-8901>

Bohdan Shkurat (Doctor of Philosophy)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Dmytro Rieznik (Candidate of military sciences, docent)

<https://orcid.org/0000-0003-3980-923X>

Hennadii Mylnikov (Candidate of military sciences, docent)

<https://orcid.org/0009-0000-9333-4349>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A COMBINED APPROACH TO OPTIMIZING THE PROVISION OF MUNITIONS FOR AIR DEFENCE UNITS

The provision of munitions for Air Defence forces and assets is an integral component of modern combat logistics. The increasing intensity and power of enemy air attack means used during the russian-

Ukrainian war imposes heightened requirements for the operational readiness and timely resupply of these munitions.

Insufficient or untimely delivery of munitions directly affects the combat readiness of Air Defence units. Therefore, the goal of this research is to define ways to increase the effectiveness of munition supply to Air Defence units by developing a combined multi-level approach to delivery optimization.

The paper proposes the formulation of a combined transport task for the delivery of munitions, distributing functions across strategic, operational, and tactical levels. To achieve the research goal, a complex of general scientific and specific methods was applied, including system analysis, synthesis, and transport task solution methods. Modeling two supply scenarios (direct delivery and hub-scenario) demonstrated the practical advantage of the proposed delivery approach over the classical one.

The research results can be used by logistics management personnel for planning the delivery of munitions and other material and technical assets in dynamic combat conditions. The article will also be useful for military logistics specialists, researchers in the field of applied optimization, and developers of automated decision support systems in logistics.

Keywords: logistics support, provision effectiveness, air defence, munitions, combined transport task.

References

1. Doktryna z orhanizatsii peremishchen ta perevezen (transportuvan) u Zbroinykh Sylakh Ukrainy VKP 4-00(03).01 : №2464\NVHSh vid 20 serpnja 2020 roku. Kyiv: HSh ZS Ukrainy, 2020.
2. Doktryna zastosuvannia syl lohistyky VKP 4-32(03).01 : №387\NVHSh vid 04 liutoho 2021 roku. Kyiv: HSh ZS Ukrainy, 2020.
3. Doktryna Obiednana lohistyka: VKP 4-00(01).01 : №2861\NVHSh vid 24 veresnia 2020 roku. Kyiv: HSh ZS Ukrainy, 2020.
4. AJP-4 (Allied Joint Doctrine for Logistics). Published by the NATO Standardization office (NSO), Dec. 2018.
5. AJP-4.4 (Allied Joint Doctrine for Movement). Published by the NATO Standardization office (NSO), Sep. 2022.
6. M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, ta V. P. Bryntseva, Zastosuvannia syl ta zasobiv protyvopovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (liutyi 2022 roku – lypen 2023 roku). Kyiv: NUOU, 2024.
7. B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, O. V. Hloba, ta V. P. Bryntseva, Zastosuvannia syl ta zasobiv protyvopovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (serpen – hruden 2023 roku). Kyiv: NUOU, 2024.
8. B. Zh. Shkurat, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, Yu. O. Horobets, P. A. Drannyk, O. V. Hloba, ta V. P. Bryntseva, Zasoby protyvopovitrianoi ta protyraketnoi oborony Syl oborony Ukrainy. Inozemne ozbroiennia. Kyiv: NUOU, 2025.
9. Ye. V. Smychenko, V. V. Polishchuk, M. Yu. Myroniuk, Yu. M. Kolomiets, ta S. M. Bazilo, "Analiz roboty orhaniv viiskovoho upravlinnia shchodo zabezpechennia materialno-tekhnichnymy zasobamy viisk protiahom 2020–2022 rokiv v zoni provedennia operatsii Obiednanykh Syl," Povitriana mits Ukrainy, vol. 1, no. 4, pp. 58–62, 2023. DOI: 10.33099/2786-7714-2023-1-4-58-62.
10. Metodychni rekomendatsii shchodo peresuvannia chastyn i pidrozdiliv ZRV. PS ZSU, 2020.
11. Nastanova z lohistychnoho zabezpechennia Zbroinykh Syl Ukrainy: Zatv. nakazom HSh ZSU №494 vid 28.08.2019 r. 2019.
12. Teoretychni osnovy MTZ viisk (syl). Kyiv: MOU TsNDI ZSU, 2014.
13. V. O. Dachkovskiy, S. A. Kopashynskiy, I. V. Ovcharenko, ta in., Osnovy otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia systemy lohistyky. Kyiv: NUOU, 2025.
14. I. S. Romanchenko, V. O. Shuienkin, S. S. Trehubenko, I. Yu. Marko, P. S. Zakusylo, ta O. I. Khazanovych, Rozvytok teorii materialno-tekhnichnoho zabezpechennia viisk. Kyiv: TsNDI ZS Ukrainy, 2020.
15. A. I. Kozachenko, Logistics and Transport Systems. Kyiv: Natsionalnyi aviatsiinyi universytet, 2020.
16. Nova Digital rozrobiv RouteStripe - produkt dlia pidvyshchennia efektyvnosti adresnoi dostavky. Ofitsiinyi sait kompanii Nova Poshta. [Online]. Dostupno: <https://novaposhta.ua/routestripe> (access date: Oct. 25, 2025).
17. Digital transformation at Maersk: the never-ending pace of change. [Online]. Dostupno: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15228053.2023.2300921> (access date: Oct. 25, 2025).
18. D. D. Kovalov, "Vykorystannia henetychnykh alhorytmiv pry planuvanni zaliznychnykh perevezen u mizhnarodnomu spoluchenni," Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti, vol. 29, no. 1, pp. 69–77, 2024. DOI: 10.18664/iksz.v29i1.300983.
19. Cargo transportation across Ukraine and Kyiv. [Online]. Dostupno: <https://rapid.com.ua/en/poslугy/perevzennya-vantazhiv-po-ukraini-and-kyivi> (access date: Oct. 25, 2025).
20. Systemnyi analiz ta doslidzhennia operatsii, V. Vitlinskiy, Ed. Kyiv: KNEU, 2018.
21. V. M. Vovk ta L. M. Zomchak, Optymizatsiini modeli ekonomiky. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2013.
22. F. D. Shvets, Osnovy naukovykh doslidzhen. Rivne: NUVHP, 2013.
23. Metody naukovo doslidzhennia. [Online]. Dostupno: <https://blog.magistr.ua/metody-naukovogo-doslidzhennia/> (data zvernennia: access date: Oct. 25, 2025).
24. M.-S. Chang, S.-R. Chen, ta C.-F. Hsueh, "Real-Time Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Delivery/Pickup Demands," Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 5, Oct. 2003, pp. 2273–2286.

ПИТАННЯ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН (ПІДРОЗДІЛІВ) ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-96-107

УДК 351.861:620.9+627.8(477)

Гаврись Андрій Петрович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2527-7906>

Філіппова Вікторія Володимирівна

<https://orcid.org/0000-0003-0771-1975>

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

ІНТЕГРАЛЬНЕ РАНЖУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ НЕБЕЗПЕКИ

У статті представлено результати дослідження щодо комплексної оцінки та ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд, зокрема гідроелектростанцій, гідроакумулювальних електростанцій, теплових електростанцій, дамб і гребель, розташованих на території України. Важливою спільною характеристикою зазначених об'єктів є експлуатація значних обсягів води – як у вигляді водосховищ, що формуються при гідро- та гідроакумулювальних електростанціях і дамбах, так і у процесах охолодження енергоблоків теплових електростанцій. Саме накопичення та техногенне утримання великих мас води створює додаткові ризики. Метою роботи є розробка підходу до визначення пріоритетності об'єктів для впровадження організаційно-технічних заходів безпеки, орієнтованих на мінімізацію наслідків можливих аварій.

Оцінювання здійснювалося за такими ключовими критеріями як встановлена потужність (для гідроелектростанцій, гідроакумулювальних електростанцій та теплоелектростанцій) та об'єм водосховища (для дамб і гребель). Методика дослідження базувалася на аналізі технічних характеристик об'єктів та встановленні відповідності між цими характеристиками, класифікації об'єктів за сукупними показниками ризику, а також ранжування з точки зору безпеки на прикладі просторового моделювання в програмному забезпеченні ArcGIS. У результаті створено ранжовані таблиці з переліком об'єктів за рівнем небезпеки та визначено черговість реалізації заходів безпеки. Візуально представлено просторову модель розміщення об'єктів на карті України.

Результати дослідження можуть бути використані в системах управління ризиками критичної інфраструктури, зокрема у плануванні державної політики, модернізації об'єктів і формуванні планів локалізації та ліквідації наслідків аварій та надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: критична інфраструктура, гідротехнічні споруди, цивільний захист, ризик, індекс небезпеки, ранжування.

Вступ

Сучасні трансформаційні процеси, що відбуваються в Україні, супроводжуються низкою викликів, які істотно впливають на рівень безпеки функціонування об'єктів критичної інфраструктури (далі - ОКИ). Особливу небезпеку становлять цілеспрямовані атаки на інфраструктурні об'єкти. З 2022 року систематичні ракетні й дроніві обстріли енергетичних підприємств України призводили до руйнування теплоелектростанцій (ТЕС), трансформаторних підстанцій і мереж, а також до критичних перебоїв в енергопостачанні цілих регіонів. Особливо небезпечними є удари по гідротехнічних спорудах: прикладом стала руйнація Каховської гідроелектростанції (ГЕС) у червні 2023 року, що спричинила масштабне затоплення, екологічні збитки та гуманітарну кризу. Такі події підтверджують, що енергетичні та гідротехнічні

об'єкти, до яких відносяться гідроелектростанції, гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС), теплові електростанції, а також дамби та греблі, стали одними з головних цілей у сучасній війні.

Одночасно глобальні кліматичні процеси – зростання середньорічних температур, нерівномірний розподіл опадів, збільшення частоти екстремальних погодних явищ (повені, паводки, посухи) – створюють додаткове навантаження на гідротехнічні споруди, прискорюючи їх фізичне старіння та підвищуючи ймовірність аварій [1].

У такій ситуації особливої ваги набуває формування науково обґрунтованого підходу до оцінювання та ранжування об'єктів критичної інфраструктури. Його ключовим завданням є визначення пріоритетності заходів із модернізації, захисту та оперативного реагування на надзвичайні події. Проте на сьогодні в Україні відсутня

уніфікована система класифікації та пріоритезації об'єктів енергетичної й гідротехнічної інфраструктури. Це істотно ускладнює планування заходів безпеки з боку державних органів, Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України), операторів критичної інфраструктури та інших зацікавлених сторін [2].

Слід підкреслити, що наявні методики оцінювання здебільшого не враховують просторово-географічний контекст, що обмежує можливості стратегічного управління ризиками на регіональному та національному рівнях. Відсутність інтегрального рейтингу, заснованого на поєднанні технічних, просторових і соціально-економічних критеріїв, ускладнює формування послідовності реалізації організаційно-технічних заходів, спрямованих на зменшення наслідків аварій та підвищення стійкості інфраструктури.

Проблематика безпеки гідротехнічних споруд та енергетичних об'єктів активно розробляється в українській та зарубіжній науковій школі. Зокрема, Г.Г. Фаренюк, О.І. Вайнберг, М.М. Хлапук, В.Д. Шумінський (2019) у своїх працях акцентують увагу на питаннях надійності гідротехнічних споруд в умовах тривалої експлуатації, підкреслюючи роль моніторингу технічного стану та удосконалення нормативно-методичної бази контролю. Їхні результати підтверджують, що більшість гідроспоруд в Україні експлуатуються понад проектні терміни, що збільшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій [7].

Дослідження П.М. Санькова, О.В. Дзюбана, О.В. Пилипенка, Н.О. Ткач, В.О. Сидорки (2022) поглиблює аналіз питань експлуатаційної безпеки гідротехнічних споруд, наголошуючи на необхідності створення єдиної системи оцінювання їхнього технічного стану та впровадження превентивних заходів щодо попередження руйнувань. Автори пропонують інтеграцію результатів інженерного моніторингу з геоінформаційними базами даних, що співзвучно із підходами, викладеними в даному дослідженні [8].

Сучасні українські дослідники Ю.П. Стародуб, А.П. Гаврись, В.В. Філіппова (2022) наголошують на важливості моделювання зон паводкового затоплення для запобігання надзвичайним ситуаціям та удосконалення системи управління ризиками гідрологічного походження. У подальшій роботі Гаврись, Філіппова, Тур (2024) розвинули цю ідею в контексті інформаційного аналізу систем захисту об'єктів критичної інфраструктури в період воєнного стану, що підтверджує актуальність поєднання технічних і просторових методів оцінювання небезпеки [9-11].

Зарубіжні дослідники також приділяють значну увагу питанням ризиків та стійкості гідротехнічних систем. Так, R. A. Daniel і T. M. Paulus (2019) у своїй праці "Managing accidents and failures of hydraulic structures" розробили модель управління аваріями та відмовами гідроспоруд, де підкреслено значення прогнозування наслідків через GIS-технології та інтегральні індекси ризику. Аналогічно, M. A. Tadda, A. Ahsan, M. Imteaz та ін. (2020) запропонували

підхід до оцінки ризику з урахуванням кліматичних змін і старіння інфраструктури, наголошуючи на міждисциплінарності підходів до забезпечення стійкості енергетичних систем [12, 13].

Більш новітні дослідження, такі як Y. Mohamed, K. Alla, L. Liu (2021), зосереджуються на просторовому моделюванні впливу руйнування дамб на прилеглі території, підкреслюючи необхідність інтеграції картографічних моделей у процес ухвалення управлінських рішень. Подібні висновки роблять автори звіту Центру безпекових досліджень ETH Zurich (2024), які визначають геоінформаційний моніторинг як ключовий елемент сучасного управління критичною інфраструктурою [14-16].

Разом із тим значна частина наявних досліджень залишається фрагментарною – зосереджуючись або на окремих типах споруд (наприклад, лише на ГЕС), або на вузьких технічних чи екологічних аспектах. Недостатньо розробленим залишається інтегральний підхід, який би поєднував оцінювання різних типів споруд за критеріями потужності, геопросторових характеристик, рівня небезпеки та стратегічної важливості. Крім того, бракує візуалізаційних інструментів (картографічних моделей, інтегральних рейтингів), які могли б стати практичною основою для ухвалення управлінських рішень у системі національної безпеки [17-20].

Саме на вирішення цих проблем спрямоване дане дослідження, у якому запропоновано інтегральний метод оцінки та ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд України із залученням геоінформаційних технологій, що поєднує технічні, просторові та аналітичні критерії для підвищення ефективності управління ризиками в енергетичному секторі.

Матеріали та методи

Метою дослідження є формування інтегрального підходу до комплексної оцінки та ранжування енергетичних та гідротехнічних споруд України (гідроелектростанцій, гідроакумулювальних електростанцій, теплових електростанцій, дамб і гребель) з точки зору безпеки на основі аналізу їхньої встановленої потужності та об'єму водосховищ. Такий підхід дозволяє визначити рівень потенційної небезпеки кожного об'єкта, оцінити масштаби можливих наслідків надзвичайних ситуацій та обґрунтувати пріоритетність провадження організаційно-технічних заходів безпеки.

Завдання дослідження полягають в:

аналізі технічних та просторових характеристик енергетичних і гідротехнічних споруд України (ГЕС, ГАЕС, ТЕС, дамб і гребель) з метою визначення ключових параметрів, що впливають на рівень потенційної небезпеки.

розробленні інтегральної методики оцінювання та ранжування об'єктів за критеріями встановленої потужності й об'єму водосховища із визначенням вагових коефіцієнтів та шкали рівнів небезпеки.

здійсненні класифікації та просторової візуалізації об'єктів критичної інфраструктури на

основі запропонованої методики, формуванні інтегрального індексу небезпеки та визначенні пріоритетності організаційно-технічних заходів для підвищення рівня безпеки.

Об'єктами дослідження є об'єкти енергетичної та гідротехнічної інфраструктури України: гідроелектростанції, гідроакумулювальні електростанції, теплові електростанції, дамби та греблі.

Предметом дослідження є методика ранжування об'єктів енергетичної та гідротехнічної інфраструктури за такими ключовими показниками як встановлена потужність об'єкта (для ГЕС, ГАЕС та ТЕС) та об'єм водосховища (для дамб, гребель і ГЕС/ГАЕС, які утворюють великі водні масиви).

Додатково враховуються можливі соціально-економічні наслідки аварій, які визначаються масштабом об'єкта та територіальним контекстом його розташування.

Методологія дослідження.

Методика комплексного оцінювання та ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд України ґрунтується на поетапному підході. На першому етапі здійснено збір і систематизацію даних щодо основних характеристик об'єктів (місце розташування, потужність, об'єм водосховища) на основі офіційних джерел, наукових публікацій і відкритих баз даних.

Другим етапом було визначення критеріїв оцінки: для енергетичних об'єктів – встановлена потужність (МВт), для гідротехнічних – об'єм водосховища (км³). У випадку комбінованих споруд (ГЕС, ГАЕС) застосовано інтегральний підхід, що враховує обидва параметри.

На третьому етапі проведено класифікацію та ранжування об'єктів за рівнями небезпеки (низький, середній, високий) з поділом за потужністю та об'ємом водосховища.

Результати оцінювання візуалізовано за допомогою геоінформаційних технологій (ArcGIS), що дало змогу визначити просторові закономірності розташування об'єктів і зони концентрації ризиків.

На завершальному етапі здійснено аналітичну інтерпретацію отриманих даних із формуванням рекомендацій щодо пріоритетності організаційно-технічних заходів безпеки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання різними суб'єктами системи захисту критичної інфраструктури:

центральними органами виконавчої влади, уповноваженими у сфері цивільного захисту та енергетичної безпеки (зокрема, Державною службою України з надзвичайних ситуацій, Міністерством енергетики України) – для планування заходів з моніторингу техногенних ризиків, оцінювання рівнів критичності та визначення пріоритетних об'єктів для реалізації заходів безпеки;

органами державної влади та місцевого самоврядування – при розробленні регіональних програм підвищення стійкості критичної інфраструктури, удосконаленні планів реагування на

надзвичайні ситуації та планів локалізації і ліквідації аварій;

суб'єктами господарювання – операторами об'єктів критичної інфраструктури – для підвищення рівня експлуатаційної безпеки, запровадження превентивних технічних заходів, удосконалення систем моніторингу та оцінювання стану споруд;

науковими установами та аналітичними центрами – як аналітичної бази для розроблення моделей прогнозування ризиків, оцінювання впливу воєнних і кліматичних чинників на безпеку об'єктів енергетичної та гідротехнічної інфраструктури, а також для створення інформаційно-аналітичних систем підтримки управлінських рішень.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні інтегрованої методики оцінки ризиків, що поєднує технічні, просторові та нормативні критерії, а також у створенні картографічної моделі розподілу небезпек, орієнтованої на практичне застосування в державній системі захисту критичної інфраструктури.

Результати

1. Загальна характеристика об'єктів дослідження

Енергетичні та гідротехнічні споруди України становлять основу критичної інфраструктури держави, забезпечуючи стабільність енергопостачання, водного балансу та захист від гідрологічних ризиків. До цієї категорії належать гідроелектростанції, гідроакумулювальні електростанції, теплові електростанції, а також дамби й греблі, які виконують взаємопов'язані функції у загальнодержавній енергетичній і водогосподарській системі.

За даними на 2022 рік, в Україні функціонувало понад 1000 гідроелектростанцій різної потужності, з яких 7 відносилися до великих, 3 – до середніх, решта – до малих, міні- та мікроГЕС. Сумарна встановлена потужність гідроелектростанцій становила близько 6,2 ГВт, що дорівнювало приблизно 9-10 % загального електрогенеруючого потенціалу країни. У 2023 році внаслідок руйнування Каховської ГЕС встановлена потужність знизилася до 5,86 ГВт, а частка гідроенергетики у виробництві електроенергії скоротилася до 8 %.

Гідроакумулювальні електростанції посідають важливе місце у структурі енергетичного комплексу України, забезпечуючи оперативне регулювання режимів роботи Об'єднаної енергетичної системи. Їх головна функція полягає у накопиченні надлишкової електроенергії в години мінімального споживання та подальшому відпуску під час пікових навантажень, що підвищує гнучкість і надійність енергопостачання. В Україні експлуатуються три гідроакумулювальні електростанції – Дністровська, Ташлицька та Київська, які виконують ключову роль у стабілізації енергетичного балансу держави. Наймасштабнішим об'єктом є Дністровська ГАЕС, проектна потужність якої після завершення будівництва перевищить 2,2 ГВт, що дозволяє

віднести її до числа найбільших гідроаккумулятивних комплексів Європи.

Теплові електростанції залишаються одним із провідних елементів національної енергетичної системи України, забезпечуючи генерацію електроенергії. Станом на 2022 рік частка ТЕС у загальному енергетичному балансі перевищувала 30 %, що свідчить про їх суттєве значення у структурі енергетичного сектору. На території держави експлуатується близько 15 великих теплоелектростанцій, розташованих переважно у промислових регіонах центральної, східної та західної частини України.

Дамби й греблі є важливими гідротехнічними спорудами, призначеними для регулювання річкового стоку, утворення водосховищ, накопичення та розподілу водних ресурсів. Вони забезпечують стабільне функціонування водогосподарських систем, підтримують рівень води в річках і каналах, сприяють зрошенню, водопостачанню та захисту територій від паводків. Їхня надійна робота має вирішальне значення для енергетики, сільського господарства й безпеки населених пунктів.

Сукупність енергетичних і гідротехнічних споруд України формує критичну інфраструктурну мережу, від стабільності якої залежить енергетична, екологічна та продовольча безпека держави. В умовах воєнних дій, системних кібератак та кліматичних змін вразливість цих об'єктів зростає, що зумовлює необхідність їх комплексної оцінки та ранжування за рівнем небезпеки й пріоритетністю впровадження заходів захисту.

2. Ранжування за категоріями об'єктів

Незважаючи на наявність законодавчої бази для визначення об'єктів критичної інфраструктури, зокрема Закону України «Про критичну інфраструктуру» від 16 листопада 2021 р. № 1882-IX та Постанови Кабінету Міністрів України «Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури» від 09 жовтня 2020 р. № 1109, у яких передбачені загальні критерії категоризації об'єктів (за впливом на життєво важливі функції, надання життєвих послуг тощо). Проте ці критерії не адаптовані до особливостей енергетичних і гідротехнічних споруд – таких як водосховища, гідродинамічні навантаження, потенційні затоплення та інші водогосподарські фактори. Вони дають змогу віднести об'єкт до категорії критичності, але не забезпечують глибинного порівняння споруд за рівнем техногенних ризиків.

Відповідно до статті 10 пункту 2 Закону України «Про критичну інфраструктуру» від 16 листопада 2021 р. № 1882-IX, установлюються такі категорії критичності об'єктів:

I категорія критичності – особливо важливі об'єкти, які мають загальнодержавне значення, значний вплив на інші об'єкти критичної інфраструктури та порушення функціонування яких призведе до виникнення кризової ситуації державного значення;

II категорія критичності – життєво важливі об'єкти, порушення функціонування яких призведе

до виникнення кризової ситуації регіонального значення;

III категорія критичності – важливі об'єкти, порушення функціонування яких призведе до виникнення кризової ситуації місцевого значення;

IV категорія критичності – необхідні об'єкти, порушення функціонування яких призведе до виникнення кризової ситуації локального значення.

Наведена класифікація визначає базову структуру для ідентифікації об'єктів критичної інфраструктури, проте не деталізує технічні критерії, які дозволяють проводити порівняльну оцінку небезпеки в межах енергетичної та гідротехнічної галузей. Зокрема, у чинних нормативних підходах не враховано такі ключові параметри, як потужність об'єкта та об'єм водосховища, що безпосередньо визначають масштаб можливих наслідків у разі аварій або руйнування споруд. Саме тому в даному дослідженні категорії критичності адаптовано до особливостей енергетичних і гідротехнічних об'єктів та використано як основу для формування інтегральної шкали рівнів небезпеки.

У галузевих нормативних актах, зокрема ДСТУ 7501:2014 «Гідроенергетика. Гідроелектростанції малі. Терміни та визначення понять», ГКД 34.20.507-2003 «Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж» та інших документах, що регламентують технічну експлуатацію об'єктів енергетичної інфраструктури, основну увагу приділено забезпеченню надійності функціонування та проведенню технічного контролю окремих споруд. Водночас ці нормативи не містять єдиної методологічної основи для системного порівняння рівнів ризику між різними типами енергетичних і гідротехнічних об'єктів, що обмежує можливості комплексного управління безпекою в масштабах усієї інфраструктури.

Таким чином, існуюча нормативна класифікація не дає змоги визначати пріоритетні споруди для реалізації заходів безпеки всередині груп енергетичних і гідротехнічних об'єктів. Саме через це в цій роботі запропоновано методику інтегрального ранжування ГЕС, ГАЕС, ТЕС, дамб і гребель з урахуванням специфіки водогосподарської та енергетичної діяльності. Такий підхід може доповнити державні механізми категоризації, створивши інструмент для обґрунтованого управління ризиками й визначення пріоритетів модернізації та захисту. Розглянемо кожен групу цих об'єктів.

Гідроелектростанції

Гідроелектростанції є одним із ключових елементів енергетичної системи України, оскільки забезпечують виробництво електроенергії за рахунок використання водних ресурсів та формують великі водосховища, що мають стратегічне значення для енергетики, водопостачання та зрошення. Найпотужніші ГЕС зосереджені на річці Дніпро (Київська, Канівська, Кременчуцька, Дніпровська, Каховська, Середньодніпровська), а також на Дністрі (Дністровська ГЕС).

Для оцінювання рівня небезпеки враховувалася встановлена потужність станцій та об'єм

водосховищ, оскільки саме ці показники визначають масштаби можливих наслідків у разі аварії чи руйнування споруди. Результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Визначення рівнів небезпеки для ГЕС та ГАЕС враховуючи потужність об'єкта та об'єм водосховища

Потужність \ Об'єм	Малі <0.01	Невеликі 0.01-0.1	Середні 0.1-1	Великі 1-10	Дуже великі 10-50	Найбільші >50
Малі <10 МВт	● Низький	● Низький	■ Середній	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий
Середні 10–30 МВт	● Низький	■ Середній	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий
Великі >30 МВт	■ Середній	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий

Авторами запропонована наступна шкала рівнів небезпеки:

● Низький рівень небезпеки: малі ГЕС з малими водоймами, що не становлять значної загрози при аварії та можуть обійтись мінімальним контролем.

■ Середній рівень небезпеки: Можлива загроза для навколишнього середовища або

населених пунктів поблизу, тому потрібен регулярний моніторинг і готовність реагувати.

▲ Високий рівень небезпеки: це великі або середні за потужністю ГЕС із великими водосховищами, що у разі аварії створюють катастрофічні наслідки, це зумовлює необхідність планів евакуації, автоматичного сповіщення та посилення технічного контролю. Відповідно до рівнів небезпеки було сформовано табл. 2.

Таблиця 2

Ранжування гідроелектростанцій України

№ з/п	Назва ГЕС	Місцезнаходження	Потужність (МВт)	Назва водосховища	Об'єм (км³)	Рівень небезпеки
1.	Дніпровська	Запорізька	1579	Дніпровське	3,32	▲
2.	Дністровська	Чернівецька	702	Дністровське	2,0	▲
3.	Кременчуцька	Кіровоградська	686	Кременчуцьке	13,5	▲
4.	Канівська	Черкаська	472	Канівське	2,63	▲
5.	Київська	Київська	440	Київське	3,73	▲
6.	Середньодніпровська	Дніпропетровська	352	Кам'янське	2,45	▲
7.	Каховська	Херсонська	334,8	Каховське	18,2	▲
8.	Нижньодністровська	Чернівецька	40,8	Дністровське (буферне)	44,9	▲
9.	Теребле-Ріцька	Закарпатська	27	Вільшанське	0,024	■
10.	Олександрівська	Миколаївська	11,5	Олександрівське	0,114	■

Виходячи з результатів ранжування гідроелектростанцій України (таб. 2) найбільш небезпечними є великі ГЕС із водосховищами, об'ємом понад 10 км³ (Каховська, Кременчуцька, Київська), оскільки потенційні наслідки їхнього руйнування матимуть катастрофічний характер – затоплення значних територій, руйнування інфраструктури, загрозу життю населення. Середні та малі ГЕС із меншими водоймами становлять локальну небезпеку, та їх аварії не мають таких масштабних наслідків.

Гідроакмулювальні електростанції

ГАЕС є унікальними об'єктами енергетичної інфраструктури, оскільки поєднують ознаки енергогенерувальних і гідротехнічних споруд. Це зумовлює необхідність урахування комбінованих критеріїв безпеки під час їхнього оцінювання – як

технічних (встановлена потужність), так і просторових (об'єм водосховищ). Такий підхід дає змогу комплексно визначати рівень потенційної небезпеки та формувати інтегральні показники ризику. Результати ранжування ГАЕС наведені в табл. 3. Для ранжування ГАЕС використовувались дані з табл. 1.

Усі три ГАЕС віднесено до категорії високого рівня небезпеки, оскільки вони поєднують значну встановлену потужність та великі об'єми водосховищ. У разі аварії можливе виникнення масштабних наслідків для енергосистеми, локальних населених пунктів і промислових об'єктів. Найбільшу небезпеку становить Дністровська ГАЕС як за потужністю, так і за стратегічною роллю в енергетичному балансі держави.

Таблиця 3

Ранжування гідроакумулявальних електростанцій України						
№ з/п	Назва ГАЕС	Місцезнаходження	Потужність (МВт)	Водосховище	Об'єм (млн.м ³)	Рівень небезпеки
1	Київська	Київська	235	Київське	3,7	▲
2	Ташлицька	Миколаївська	302	Ташлицьке	0,86	▲
3	Дністровська	Чернівецька	972	Дністровське	3,0	▲

Теплові електростанції

ТЕС залишаються основою генерації електроенергії в Україні, особливо у зимовий період та за умов зменшення виробництва з боку відновлюваних джерел. Для ранжування ТЕС було враховано їхню потужність і джерела охолодження (водосховища або водойми). Найбільші ТЕС

зосереджені у східних, центральних та західних областях – Запорізька, Бурштинська, Трипільська, Ладизинська, Зміївська тощо. Для теплоелектростанцій авторами запропоновано визначення рівнів небезпеки, які наведені в табл. 4. На основі цих рівнів небезпеки, результати ранжування наведені в табл. 5.

Таблиця 4

Визначення рівнів небезпеки для ТЕС враховуючи потужність об'єкта та об'єм водосховища

Потужність \ Об'єм	Малі <0,01	Невеликі 0,01-0,1	Середні 0,1-1	Великі 1-10	Дуже великі 10-50	Найбільші >50
Малі <100 МВт	● Низький	● Низький	■ Середній	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий
Середні 100-250	● Низький	■ Середній	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий
Середні/Великі 250-1000	■ Середній	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий
Великі >1000	■ Середній	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий	▲ Високий

Таблиця 5

Ранжування теплоелектростанцій України						
№ з/п	Назва ТЕС	Місцезнаходження	Потужність (МВт)	Водосховище / джерело охолодження	Об'єм (км ³)	Рівень небезпеки
1.	Запорізька	Запорізька	3650	Каховське	18,2	▲
2.	Криворізька	Дніпропетровська	2 820	Зеленодольське	0,074	▲
3.	Бурштинська	Івано-Франківська	2 400	Бурштинське	0,5	▲
4.	Зміївська	Харківська	2 200	Лиман	0,011	▲
5.	Старобешівська	Донецька	2 010	Старобешівське	0,044	▲
6.	Трипільська	Київська	1 800	Канівське	2,63	▲
7.	Ладизинська	Вінницька	1 800	Ладизинське	0,15	▲
8.	Придніпровська	Дніпропетровська	1 765	Дніпровське	3,32	▲
9.	Курахівська	Донецька	1 527	Курахівське	0,062	▲
10.	Зуївська	Донецька	1 245	Озеро-охолоджувач	0,005	■
11.	Луганська	Луганська	1 220	Сіверський Донець	0,008	■
12.	Вуглегірська	Донецька	1200	Вуглегірське	0,16	▲
13.	Слов'янська	Донецька	880	Сіверський Донець	–	●
14.	Добротвірська	Львівська	500	Добротвірське	14,65	▲
15.	Миронівська	Донецька	115	Миронівське	4,76	▲

Найбільш небезпечними є великі ТЕС із потужністю понад 1000 МВт, особливо ті, що використовують великі водосховища (Запорізька, Придніпровська, Трипільська). Їх аварія чи руйнування може призвести до втрати значної частини генерації та масштабних перебоїв в енергопостачанні. Середні ТЕС (500-1000 МВт)

створюють регіональний ризик, тоді як малі мають переважно локальний вплив.

Дамби та греблі

В Україні налічується понад 1200 дамб і гребель, більшість з яких розташована у басейнах великих річок – Дніпра, Дністра, Південного Бугу та Сіверського Дінця. Ці споруди формують систему водосховищ і каналів, що відіграють

ключову роль у забезпеченні енергетики, зрошенні та водопостачанні. Проте значна частина з них функціонує понад проектні терміни, має підвищений рівень фізичного зносу, що створює потенційні ризики аварій і потребує системного моніторингу технічного стану.

У чинних нормативних документах України відсутня офіційна класифікація водосховищ за об'ємом або рівнем потенційної небезпеки. Єдине визначення подано у Водному кодексі України від 06 червня 1995 р. №213/95-ВР, де водосховище трактується як штучна водойма місткістю понад 1 мільйон кубічних метрів, збудована для створення запасу води та регулювання її стоку. Тому для даного дослідження класифікаційні межі прийнято із узагальнення положень наукових і галузевих джерел, зокрема рекомендацій щодо оцінки гідродинамічної безпеки та масштабів можливих наслідків аварій.

Для оцінки рівня небезпеки дамб і гребель використано показники об'єму водосховища, що дають змогу диференціювати споруди за потенційними наслідками у разі руйнування та визначити пріоритетність заходів безпеки. Результати наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Категорії об'єму водосховищ (для дамб і гребель)

Категорія об'єму	Об'єм (км³)	Рівень небезпеки
Малі	до 0,01	● Низький
Невеликі	0,01 – 0,1	● Низький
Середні	0,1 – 1	■ Середній
Великі	1 – 10	▲ Високий
Дуже великі	10 – 50	▲ Високий
Найбільші	понад 50	▲▲ Дуже високий

У межах проведеного аналізу було здійснено ранжування водосховищ України за об'ємом, що перевищує 0,01 км³. Відповідно до прийнятої класифікації, рівень небезпеки визначався на основі потенційних наслідків у разі руйнування гідротехнічних споруд, які утворюють ці водойми.

Більшість проаналізованих водосховищ (зокрема Чорнорічине, Сімферопольське, Фронтове, Партизанське, Загірське, Станційне, Турське озеро, Південне, Златоустівське СН № 2, Шолоховське № 14, Кам'янське СН № 3, Миколаївське, Голубе озеро, Баглійське (верхнє), Кресівське, Макортівське, Карлівське, Верхнє Карлівське, Клебан-Бицьке, Велике Кальміуське, Павлопільське, Старокримське, Миколаївське, Вільхівське, Ханжонківське, Волинцівське, Грабівське, Денишівське, Відсічне, Житомирське, Іршанське, Малинське, Лісове, Вільшанське, Бердянське, Чечвинське, Білоцерківське (верхнє), Великий Супій, Малий Супій, Малий Супій № 3, Новоархангельське, Іскрівське, Ісаківське, Кам'янське, Сватівське, Щербанівське, Софіївське, Катеринівське, Степівське, Жовтневе, Озеро Картал, Кучурганське, Барабойське, Хаджидерське,

Погребівське, Карабутівське, Тернопільське, В'ялівське, Великобурлуцьке, Муромське, Рогозянське, Трав'янське, Орільське, Сергіївське, Олександрівське, Ярошинське) мають об'єм у межах від 0,01 до 0,1 км³, що відповідає низькому рівню небезпеки (●). У разі їхнього прориву наслідки матимуть локальний характер – підтоплення прилеглих сільських територій, незначні втрати водогосподарських об'єктів або короточасні екологічні зміни. До цієї групи належить переважна більшість водосховищ у АР Крим, Дніпропетровській, Донецькій, Житомирській, Київській, Миколаївській, Луганській, Одеській, Харківській та інших областях. Їхня спільна характеристика – обмежений масштаб водойми та відсутність значних населених пунктів у зоні можливого затоплення.

До середнього рівня небезпеки (■) (об'єм у межах 0,1-1 км³) віднесено невелику частку водойм, серед яких: Карачунівське (0,308 км³) в Дніпропетровській області, озеро Ялпуг-Кугурлуй (0,888 км³), Сасик (0,459 км³), озеро Кагул (0,250 км³), Катлабух (0,131 км³) Китай (0,111 км³), в Одеській області, Краснопавлівське (0,410 км³) та Печенізьке (0,383 км³) у Харківській області, а також водойма-охолоджувач Хмельницької АЕС (0,120 км³). Такі об'єкти мають регіональне значення, і в разі аварії можуть спричинити підтоплення або порушення водопостачання для прилеглих населених пунктів, однак не створюють загальнонаціональної загрози.

Зазначені результати пояснюються тим, що великі водосховища з об'ємом понад 1 км³ (Кременчуцьке, Київське, Дніпровське, Дністровське, Каховське) уже були враховані в межах ранжування гідроелектростанцій, гідроакумулювальних електростанцій і теплових електростанцій, які безпосередньо експлуатують ці водойми. Тому у межах цього ранжування розглянуто локальні та середні водосховища, що пояснює відсутність об'єктів із високим (▲) або дуже високим рівнем небезпеки (▲▲).

Виходячи з вищезазначеного, низький і середній рівні небезпеки свідчать про локальний характер потенційних ризиків для більшості водосховищ України. Проте навіть ці об'єкти потребують систематичного технічного нагляду, адже їхній вік, стан гідроспоруд і відсутність належного обслуговування можуть підвищити ризики локальних аварій, особливо у періоди паводків або інтенсивних опадів.

Обговорення

1. Порівняння та інтегральна оцінка ризиків

На основі отриманих результатів ранжування здійснено порівняльний аналіз рівнів небезпеки між різними типами енергетичних і гідротехнічних об'єктів та проведено їх інтегральну оцінку за сукупними показниками потужності й об'єму водосховищ.

Зокрема:

Гідроелектростанції із великими водосховищами (Каховська, Кременчуцька, Київська) становлять надзвичайно високий рівень небезпеки, оскільки поєднують значну енергетичну потужність із ризиком катастрофічного затоплення великих територій.

Теплоелектростанції великої потужності (Запорізька, Бурштинська, Трипільська) здатні спричинити масштабні енергетичні кризи у разі аварії, однак їхні екологічні та соціальні наслідки, як правило, мають локальний характер порівняно з ГЕС.

Гідроакумуляційні електростанції посідають проміжне місце: вони критично важливі для балансування енергосистеми, однак через відносно менші об'єми водойм їхні аварії не призведуть до таких катастрофічних затоплень, як у випадку великих ГЕС.

Дамби та греблі різняться за ступенем небезпеки залежно від об'єму водосховища та технічного стану споруди. Малі й середні водойми несуть локальний ризик, тоді як великі (понад 10 км³) можуть створювати загрозу регіонального масштабу.

Задля об'єктивного співставлення результатів авторами було застосовано інтегральний індекс небезпеки (ІН), що враховує два основних критерії:

P – встановлена потужність об'єкта (у відносних балах, залежно від діапазону потужності);

V – об'єм водосховища (у відносних балах, залежно від класифікації за розмірами).

З метою інтегральної оцінки ризику використано показник інтегрального індексу небезпеки, який обчислюється за формулою:

$$ІН = P \times w_1 + V \times w_2$$

де w_1 та w_2 – вагові коефіцієнти.

У межах цього дослідження для енергетичних об'єктів прийнято вагові

коефіцієнти $w_1=0,6$ і $w_2=0,4$ тоді як для гідротехнічних – у зворотному співвідношенні, що відображає домінуючий вплив потужності або об'єму водосховища відповідно. Отримані значення ІН співвідносяться з категоріями критичності, визначеними статтею 10 пунктом 2 Закону України «Про критичну інфраструктуру» від 16 листопада 2021 р. № 1882-ІХ.

Приклад інтерпретації:

об'єкти із високою потужністю та малим об'ємом водосховища характеризуються середнім рівнем небезпеки.

об'єкти із середньою потужністю, але з великим водосховищем відносяться до високого рівня небезпеки.

найбільш критичними є енергетичні та гідротехнічні об'єкти, що поєднують високу потужність та великі об'єми водосховища, для них інтегральний індекс небезпеки досягає максимальних значень.

З урахуванням положень статті 10 пункту 2 Закону України «Про критичну інфраструктуру» від 16 листопада 2021 р. № 1882-ІХ, отримані результати інтегральної оцінки ризиків співвіднесено з категоріями критичності об'єктів. Об'єкти з високими значеннями ІН (>2,6) відповідають I категорії критичності, тобто мають загальнодержавне значення та створюють ризик кризових ситуацій державного масштабу. До II категорії віднесено споруди середнього рівня небезпеки (1,6-2,5), порушення роботи яких спричиняє регіональні наслідки. Об'єкти з низьким рівнем ІН (1,0-1,5) відповідають III-IV категоріям критичності, що мають локальний характер впливу (табл. 7). Така адаптація дозволяє поєднати технічну оцінку ризиків із нормативною категоризацією критичної інфраструктури та сформулювати єдину шкалу для пріоритезації заходів безпеки.

Таблиця 7

Інтегральна класифікація рівнів небезпеки та категорій критичності об'єктів енергетичної й гідротехнічної інфраструктури

Категорія критичності	Значення ІН	Рівень небезпеки	Характеристика та можливі наслідки
I категорія	2,6 – 4,0	 Високий	Об'єкти загальнодержавного значення (великі ГЕС, ТЕС, ГАЕС) та/або об'єкти з дуже великими водосховищами (>10 км ³). У разі аварії можливі катастрофічні наслідки: затоплення міст, руйнування інфраструктури, масові евакуації, втрата стратегічних енергетичних потужностей.
II категорія	1,6 – 2,5	 Середній	Об'єкти регіонального значення – середні ГЕС і ТЕС, а також гідротехнічні споруди з водосховищами 0,1-10 км ³ . Наслідки можуть охоплювати регіональний рівень, з ризиком затоплення населених пунктів чи перебоїв в енергопостачанні.
III-IV категорії	1,0 – 1,5	 Низький	Об'єкти малої потужності (ТЕС<100 МВт, ТЕС/ГАЕС<10МВт) та/або з невеликими водоймами (<0,1 км ³). Локальні наслідки у разі аварії, мінімальний вплив на населення та інфраструктуру.

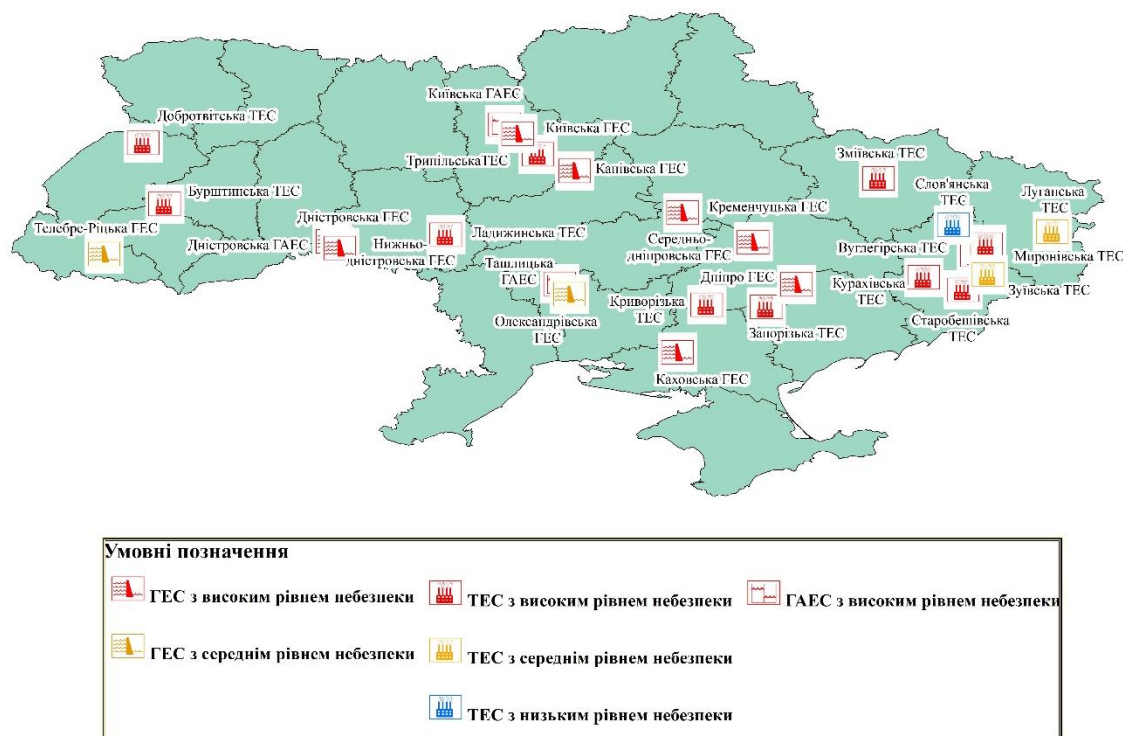
Інтерпретація таблиці.

Запропонована шкала інтегрального індексу небезпеки дозволяє систематизувати оцінку

об'єктів критичної інфраструктури та наочно відобразити різницю між ними за потенційними наслідками аварій. До категорії низького ризику

2. Просторова візуалізація результатів

Важливою складовою комплексної оцінки об'єктів енергетичної та гідротехнічної інфраструктури є їх геопросторова візуалізація, яка дозволяє оцінити просторову концентрацію ризиків на території держави. Для цього у програмному середовищі ArcGIS було виконано картографічне моделювання розміщення гідроелектростанцій, гідроакумулювальних електростанцій та теплових електростанцій України (рис. 1) відповідно.



На рисунку 1 представлено просторову модель розташування зазначених об'єктів, класифікованих за рівнями небезпеки:

- ▲ високий рівень небезпеки – великі за потужністю ГЕС, ГАЕС та ТЕС;
 ▨ середній рівень небезпеки – середні за потужністю ГЕС і ТЕС;
 ○ низький рівень небезпеки – локальні споруди малої потужності.

Кожен тип об'єкта відображено окремим символом, що дозволяє візуально порівняти просторовий розподіл різних категорій енергетичних споруд.

Регіональні особливості розташування:

- найбільша концентрація об'єктів високого рівня небезпеки спостерігається у басейні річки Дніпро (Київська, Черкаська, Кіровоградська, Дніпропетровська, Запорізька, Херсонська області), де розташовані каскади великих ГЕС та потужних ТЕС. Цей регіон є зоною підвищеної небезпеки національного масштабу;

- значний рівень небезпеки виявлено у басейні річки Дністер (Чернівецька область) через розміщення Дністровської ГЕС і Дністровської ГАЕС;
- у східних областях України (Донецька, Луганська, Харківська) основну загрозу становлять великі ТЕС, які, окрім техногенного навантаження, перебувають у зоні активних воєнних дій;
- у західних регіонах (Івано-Франківська, Львівська області) переважають ТЕС середньої потужності та малі ГЕС, що створюють локальні, але не катастрофічні наслідки.

Просторове картографування показало, що найбільш небезпечними є регіони з високою щільністю потужних енергетичних і гідротехнічних споруд та великими водосховищами. Отримана візуалізація дає змогу ідентифікувати зони пріоритетного контролю й ефективно планувати заходи безпеки з урахуванням територіальної концентрації потенційних загроз.

Висновки

У результаті проведеного дослідження сформовано інтегральний підхід до комплексної оцінки та ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд України за рівнем безпеки, що ґрунтується на поєднанні технічних, просторових та аналітичних критеріїв.

Запропонована методика дозволяє об'єктивно визначати пріоритетність реалізації організаційно-технічних заходів безпеки для кожного типу споруд, враховуючи їхню потужність, обсяг водосховищ і просторову концентрацію ризиків.

Систематизовано інформацію про основні типи об'єктів критичної інфраструктури України – гідроелектростанції, гідроакумулювальні електростанції, теплові електростанції, дамби та греблі та визначено, що найбільшу потенційну небезпеку становлять об'єкти, пов'язані з експлуатацією великих обсягів води – як у процесах виробництва електроенергії, так і у водогосподарських функціях.

Розроблено методику ранжування об'єктів за двома базовими показниками – встановленою потужністю та об'ємом водосховища. Такий підхід забезпечує універсальну оцінку рівня небезпеки незалежно від типу споруди та дає змогу порівнювати різні категорії енергетичних і гідротехнічних об'єктів в єдиній системі координат.

Встановлено інтегральну шкалу рівнів небезпеки, що відповідає категоріям критичності, визначеним Законом України «Про критичну інфраструктуру» від 16.11.2021 року № 1882-IX, що дозволило пов'язати технічні характеристики споруд із нормативною системою оцінювання, що робить результати дослідження придатними для практичного використання органами державного управління.

Запропоновано інтегральний індекс небезпеки, який враховує вагові коефіцієнти потужності та об'єму водосховища. Цей індекс забезпечує кількісне визначення категорії критичності кожного об'єкта і може стати основою для побудови національної бази даних оцінки ризиків у сфері енергетичної та гідротехнічної безпеки.

Виконано просторове картографування результатів у середовищі ArcGIS, що демонструє територіальну концентрацію ризиків і дозволяє виділити зону найвищої небезпеки, регіональні осередки ризику та локальні зони техногенного навантаження. Така візуалізація є ефективним інструментом для стратегічного планування безпеки та моніторингу.

Отримані результати становлять наукове підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на удосконалення системи управління ризиками в умовах воєнних дій, кліматичних змін та зростання навантаження на енергетичну інфраструктуру. У подальшому результати проведеного ранжування будуть використані для формування та оптимізації комплексу організаційно-технічних заходів із захисту енергетичних і гідротехнічних об'єктів,

визначення їхньої пріоритетності та посилення стійкості до надзвичайних ситуацій.

Також отримані результати мають важливе практичне значення, оскільки можуть бути використані органами державної влади, операторами об'єктів критичної інфраструктури та науковими установами для планування та реалізації заходів із підвищення стійкості енергетичних і гідротехнічних систем, удосконалення моніторингу ризиків, забезпечення оперативного реагування на надзвичайні ситуації та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері національної безпеки.

Отже, запропонований підхід дає змогу перейти від фрагментарного до системного управління безпекою енергетичної та гідротехнічної інфраструктури, підвищуючи рівень готовності держави до запобігання і мінімізації наслідків техногенних і воєнних загроз.

Список використаних джерел

1. Україна. Водний кодекс України № 213/95-ВР, 6 черв. 1995. Дата звернення: 07 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-vr>
2. Україна. Закон України № 1882-IX, Про критичну інфраструктуру, Дата звернення: 07 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
3. Україна. Кабінет Міністрів України. Постанова № 415, Про затвердження Порядку ведення Реєстру об'єктів критичної інфраструктури, включення таких об'єктів до Реєстру, доступу та надання інформації з нього, Дата звернення: 07 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/415-2023-п#Text>
4. Україна. Кабінет Міністрів України. Постанова № 1109, Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури, Дата звернення: 07 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-п#Text>
5. ДСТУ 7501:2014. Гідроенергетика. Гідроелектростанції малі. Терміни та визначення понять. Київ, Україна: ДП «УкрНДНЦ», 2014.
6. ГКД 34.20.507-2003. Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Київ, Україна: Міненерго України, 2003.
7. G. Farenjuk, O. Vaynberg, M. Khlapuk, and V. Shuminskyi, "Надійність та безпека гідротехнічних споруд в умовах тривалої експлуатації," Наука та будівництво, т. 20, № 2, с. 4-18, 2019. doi:10.33644/scienceandconstruction.v20i2.91. Дата звернення: 17 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/91>.
8. P. Sankov, O. Dzyuban, O. Pylypenko, N. Tkach, and V. Sydorka, "Гідротехнічні споруди: надійність і безпека існування та експлуатації," Collection of Scientific Papers "SCIENTIA", Stockholm, Sweden, с. 108-111, 27 трав. 2022. Дата звернення: 17 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/79>.
9. Ю. П. Стародуб, А. П. Гаврись, В. М. Ковальчук, А. О. Рогуля та В. В. Філіппова, "Досягнення стабільного розвитку територій шляхом реалізації проєкту визначення зон паводкового затоплення в Україні," Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, № 1, с. 103-114, 2022. Дата звернення: 10 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.103-114>

10. A. Havrys, V. Filippova, and N. Tur, "Інформаційний аналіз систем захисту об'єктів критичної інфраструктури в період дії воєнного стану," Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, т. 30, с. 173–187, 2024. doi: 10.32447/20784643.30.2024.17. Дата звернення: 12 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/2780>.
11. A. Havrys, R. Veselivsky, O. Pekarska, O. Liubovetskyi, and V. Filippova, "Support system for management decision-making by heads of hydrological emergency situations liquidation using geo-information technologies," Municipal Economy of Cities, т. 1, с. 416–427, 2025. doi: 10.33042/2522-1809-2025-1-189-416-427. Дата звернення: 12 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/15824>.
12. R. A. Daniel and T. M. Paulus, "Managing accidents and failures of hydraulic structures," MATEC Web of Conferences, т. 284, 08003, 2019. doi: 10.1051/mateconf/201928408003. Дата звернення: 12 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/33/mateconf_icsf2019_08003/mateconf_icsf2019_08003.html.
13. M. A. Tadda, A. Ahsan, M. Imteaz, A. Shitu, U. A. Danhassan, and A. I. Muhammad, "Operation and maintenance of hydraulic structures," IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.91949. Дата звернення: 12 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://www.intechopen.com/chapters/72208>.
14. Y. M. Khir Alla and L. Liu, "Impacts of dams on the environment: A review," Int. J. Environ. Agric. Biotechnol., т. 6, № 1, с. 64–74, 2021. doi: 10.22161/ijeab.61.9.
15. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Risk and Resilience Report: Critical Infrastructure Resilience in Ukraine: Energy, Transportation, and Communication. Center for Security Studies (CSS), 2024. Дата звернення: 15 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/RR-Report-2024-Critical-Infrastructure-Resilience.pdf>.
16. A. B. Patel, "Remote sensing and GIS application in flood risk mapping and disaster mitigation," Int. J. Sci. Res. Mod. Technol., т. 4, № 5, с. 45–55, 2025. doi: 10.38124/ijrmt.v4i5.529. Дата звернення: 15 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://ijrmt.com/index.php/ijrmt/article/view/529>.
17. W. N. H. Wan Ariffin, "Strengthening Dam Safety Under Climate Change: A Risk-Based Assessment for the Batu Dam," Water, vol. 17, no. 19, art. 2856, 2025. doi:10.3390/w17192856. Дата звернення: 15 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/19/2856>.
18. N. Silva-Cancino, F. Salazar, J. Irazábal, and J. Mata, "Adaptive Warning Thresholds for Dam Safety: A KDE-Based Approach," Infrastructures, vol. 10, no. 7, art. 158, 2025. doi:10.3390/infrastructures10070158. Дата звернення: 15 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://www.mdpi.com/2412-3811/10/7/158>.
19. R. Murasov, "The method of risk assessment for critical infrastructure in the conditions of hostilities, taking into account their destructive and cumulative potential", JSPSDS, vol. 13, no. 1, pp. 152-160, Feb. 2023. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.1.13> Дата звернення: 17 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/514>.
20. V. Kotsyuruba and ProshchynI., "Methodology for calculating the consequences of breakthroughs (destruction) of hydraulic structures of critical infrastructure", JSPSDS, vol. 14, no. 6, pp. 127-137, Dec. 2024. Дата звернення: 17 липня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/761>.

Andrii Havrys (PhD, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2527-7906>

Viktoriia Filippova

<https://orcid.org/0000-0003-0771-1975>

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

INTEGRATED RANKING OF ENERGY AND HYDRAULIC STRUCTURES OF UKRAINE BASED ON THE HAZARD INDEX

This paper presents the results of a comprehensive assessment and ranking of major energy and hydraulic structures in Ukraine, including hydroelectric power plants, pumped storage power plants, thermal power plants, dams, and barrages. A key common feature of these facilities is the operation and management of large volumes of water—both in the form of reservoirs associated with hydro and pumped storage plants and in cooling processes at thermal power plants. The accumulation and technogenic containment of significant water masses create additional safety and environmental risks.

The purpose of this study is to develop an approach for determining the prioritization of facilities for the implementation of organizational and technical safety measures aimed at minimizing the consequences of potential accidents.

The evaluation was conducted using key criteria such as installed capacity (for hydroelectric, pumped storage, and thermal power plants) and reservoir volume (for dams and barrages). The methodology was based on an analysis of the technical characteristics of the facilities, identification of interrelations between parameters, classification of objects according to integrated risk indicators, and subsequent safety-based ranking using spatial modeling in the ArcGIS software environment. As a result, ranked tables of facilities by hazard level were generated, and the sequence for implementing safety measures was determined. A spatial model illustrating the distribution of these facilities across Ukraine was also developed.

The results of the study can be applied in critical infrastructure risk management systems, particularly for policy development, modernization of facilities, and the preparation of contingency and emergency response plans.

Keywords: critical infrastructure, hydraulic structures, civil protection, risk, hazard index, ranking

References

1. Ukraine. Vodnyi kodeks Ukrainy No. 213/95-VR, 6 cherv. 1995. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр>. [Accessed: July 07, 2025].
2. Ukraine. Zakon Ukrainy No. 1882-IX, Pro krytychnu infrastrukturu. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>. [Accessed: July 07, 2025].
3. Ukraine. Kabinet Ministriv Ukrainy. Postanova No. 415, Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia Reiestru ob'ektiv krytychnoi infrastruktury, vkluchennia takykh ob'ektiv do Reiestru, dostupu ta nadannia informatsii z noho. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/415-2023-п#Text>. [Accessed: July 07, 2025].
4. Ukraine. Kabinet Ministriv Ukrainy. Postanova No. 1109, Deiaki pytannia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-п#Text>. [Accessed: July 07, 2025].
5. DSTU 7501:2014. Hidroenerhetyka. Hidroelektrostantsii mali. Terminy ta vyznachennia poniat. Kyiv, Ukraina: DP "UkrNDNTs", 2014.
6. HKD 34.20.507-2003. Pravyła tekhnichnoi ekspluatatsii elektrychnykh stantsii i merezh. Kyiv, Ukraina: Minenerho Ukrainy, 2003.
7. G. Farenjuk, O. Vaynberg, M. Khlapuk, and V. Shumynskyi, "Nadiinst ta bezpeka hidrotekhnichnykh sporud v umovakh tryvaloï ekspluatatsii," *Nauka ta budivnytstvo*, vol. 20, no. 2, pp. 4–18, 2019. doi:10.33644/scienceandconstruction.v20i2.91. [Online]. Available: <https://journal-niisk.com/index.php/scienceandconstruction/article/view/91>. [Accessed: July 17, 2025].
8. P. Sankov, O. Dzyuban, O. Pylypenko, N. Tkach, and V. Sydorka, "Hidrotekhnichni sporudy: nadiinst i bezpeka isnuvannia ta ekspluatatsii," *Collection of Scientific Papers "SCIENTIA"*, Stockholm, Sweden, pp. 108–111, May 27, 2022. [Online]. Available: <https://previous.scientia.report/index.php/archive/article/view/79>. [Accessed: July 17, 2025].
9. Yu. P. Starodub, A. P. Havrys, V. M. Kovalchuk, A. O. Rohulia, and V. V. Filippova, "Dosiahnennia stabilnoho rozvytku terytorii shliakhom realizatsii proiektu vyznachennia zon pavodkovoho zatoplennia v Ukraini," *Nadzvychnaii sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*, no. 1, pp. 103–114, 2022. doi:10.31731/2524.2636.2022.6.1.103-114. [Online]. Available: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.103-114>. [Accessed: July 10, 2025].
10. A. Havrys, V. Filippova, and N. Tur, "Informatsiinyi analiz system zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v period dii voiennoho stanu," *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, vol. 30, pp. 173–187, 2024. doi:10.32447/20784643.30.2024.17. [Online]. Available: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnyk/article/view/2780>. [Accessed: July 12, 2025].
11. A. Havrys, R. Veselivsky, O. Pekarska, O. Liubovetskyi, and V. Filippova, "Support system for management decision-making by heads of hydrological emergency situations liquidation using geo-information technologies," *Municipal Economy of Cities*, vol. 1, pp. 416–427, 2025. doi:10.33042/2522-1809-2025-1-189-416-427. [Online]. Available: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/15824>. [Accessed: July 12, 2025].
12. R. A. Daniel and T. M. Paulus, "Managing accidents and failures of hydraulic structures," *MATEC Web of Conferences*, vol. 284, art. 08003, 2019. doi:10.1051/mateconf/201928408003. [Online]. Available: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/33/mateconf_icsf2019_08003/mateconf_icsf2019_08003.html. [Accessed: July 12, 2025].
13. M. A. Tadda, A. Ahsan, M. Imteaz, A. Shitu, U. A. Danhassan, and A. I. Muhammad, *Operation and Maintenance of Hydraulic Structures*. IntechOpen, 2020. doi:10.5772/intechopen.91949. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/72208>. [Accessed: July 12, 2025].
14. Y. M. Khir Alla and L. Liu, "Impacts of dams on the environment: A review," *Int. J. Environ. Agric. Biotechnol.*, vol. 6, no. 1, pp. 64–74, 2021. doi:10.22161/ijeab.61.9.
15. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, *Risk and Resilience Report: Critical Infrastructure Resilience in Ukraine: Energy, Transportation, and Communication*. Center for Security Studies (CSS), 2024. [Online]. Available: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis-center-for-securities-studies/pdfs/RR-Report-2024-Critical-Infrastructure-Resilience.pdf>. [Accessed: July 15, 2025].
16. A. B. Patel, "Remote sensing and GIS application in flood risk mapping and disaster mitigation," *Int. J. Sci. Res. Mod. Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 45–55, 2025. doi:10.38124/ijrsmt.v4i5.529. [Online]. Available: <https://ijrsmt.com/index.php/ijrsmt/article/view/529>. [Accessed: July 15, 2025].
17. W. N. H. Wan Ariffin, "Strengthening Dam Safety Under Climate Change: A Risk-Based Assessment for the Batu Dam," *Water*, vol. 17, no. 19, art. 2856, 2025. doi:10.3390/w17192856. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/19/2856>. [Accessed: July 15, 2025].
18. N. Silva-Cancino, F. Salazar, J. Irazábal, and J. Mata, "Adaptive Warning Thresholds for Dam Safety: A KDE-Based Approach," *Infrastructures*, vol. 10, no. 7, art. 158, 2025. doi:10.3390/infrastructures10070158. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2412-3811/10/7/158>. [Accessed: July 15, 2025].
19. R. Murasov, "The method of risk assessment for critical infrastructure in the conditions of hostilities, taking into account their destructive and cumulative potential," *JSPSDS*, vol. 13, no. 1, pp. 152–160, Feb. 2023. doi:10.33445/sds.2023.13.1.13. [Online]. Available: <https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/514>. [Accessed: July 17, 2025].
20. V. Kotsyuruba and I. Proshchyn, "Methodology for calculating the consequences of breakthroughs (destruction) of hydraulic structures of critical infrastructure," *JSPSDS*, vol. 14, no. 6, pp. 127–137, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/761>. [Accessed: July 17, 2025].

¹Авраменко Олександр Васильович (доктор технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-1358-1185>

¹Сарапін Юрій Олександрович

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

¹Яблонський Петро Михайлович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

²Федоров Олексій Валерійович

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТУВАННЯ СИСТЕМ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ОПОВІЩУВАННЯ НА ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ АВІАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ

Забезпечення безперервного функціонування систем пожежної сигналізації та оповіщення на об'єктах зберігання авіаційних засобів ураження розглядається як один із ключових елементів комплексу превентивних заходів, спрямованих на недопущення розвитку пожеж до рівня надзвичайних ситуацій. Підвищені вимоги до надійності зазначених систем зумовлюють необхідність пошуку нових, науково обґрунтованих підходів до оцінювання їх ефективності та підвищення ймовірності безвідмовної роботи.

У статті обґрунтовано підходи до оцінювання ефективності експлуатування систем пожежної сигналізації та оповіщення, які спрямовані на оптимізацію періодичності проведення їх технічного обслуговування. Використання запропонованих підходів дає змогу максимізувати значення показника надійності цих систем, мінімізувати фінансово-економічні витрати, пов'язані із їх утриманням, або досягти оптимального балансу між мінімальними витратами та гранично допустимим рівнем надійності системи.

Застосування розроблених методичних підходів до оцінки показників ефективності систем пожежної сигналізації та оповіщення у подальшому дозволить здійснювати більш точні прогнози та формувати обґрунтовані управлінські рішення щодо експлуатування цих систем. У довгостроковій перспективі це сприятиме підвищенню рівня захисту об'єктів зберігання авіаційних засобів ураження від можливих надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: надзвичайна ситуація; захист; безпека; об'єкти критичної інфраструктури; загроза; ризик; система; модель; ймовірність безвідмовної роботи; статистичні дані; економічна ефективність; вимоги до надійності; показники надійності; оцінка показників надійності; контроль технічного стану; технічне обслуговування.

Вступ

В основі визначення ефективності технічної системи (ТС) лежить принцип раціонального використання ресурсів, який виражається через відношення отриманого результату до витрат, що були необхідні для його досягнення. Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінювати продуктивність будь-якої ТС, незалежно від її масштабу чи сфери застосування.

Результат – це ключовий параметр ефективності ТС. Результатом роботи ТС може бути різноманітний набір характеристик, залежно від її призначення. Витрати є своєрідним обмежувальним фактором для досягнення максимального рівня продуктивності ТС.

Продуктивність системи пожежної сигналізації та оповіщення (СПСО) визначається її здатністю оперативно виявляти загрозу, точно локалізувати місце займання та ефективно передавати сигнал про

небезпеку.

Зважаючи на критичну роль СПСО як ключового елемента комплексної системи захисту об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ), до них висуваються підвищені вимоги до надійності. Ключова роль СПСО на ОКІ, зокрема, на об'єктах зберігання авіаційних засобів ураження (АЗУ), полягає у забезпеченні раннього виявлення займання (до початку вибухів) для оперативного реагування та мінімізації ризиків, що можуть призвести до виникнення надзвичайної ситуації (НС) та катастрофічних наслідків [1], [2].

Відповідно до [3] під ефективністю розуміється співвідношення між досягненим результатом і використаними ресурсами. Тобто визначення ефективності СПСО полягає у встановленні оптимального співвідношення між результатом та витратами, спрямованими на його отримання. Тому для досягнення високої ефективності СПСО

важливо оптимізувати процес експлуатування, зменшуючи непродуктивні витрати фінансового ресурсу та підвищуючи значення показника надійності – коефіцієнта технічного використання ("К" _тв) СПСО. В цьому контексті оцінка техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО визначається комплексним підходом, що складається з оцінки показника надійності (технічної ефективності) та показника економічної ефективності.

З технічної точки зору ефективність СПСО характеризується їхньою здатністю довготривало працювати у режимі безвідмовної роботи. Це досягається, зокрема, підвищенням ймовірності безвідмовної роботи за рахунок оптимізації періодичності проведення технічного обслуговування (ТО) СПСО [4]. З економічної точки зору оптимальна періодичність проведення ТО цих систем сприятиме зменшенню експлуатаційних витрат, оскільки дозволить уникати непотрібних або надмірно частих ремонтів, з одного боку, і запобігати критичним відмовам, які можуть призвести до НС і значних збитків, з іншого. Тобто під техніко-економічною ефективністю СПСО мається на увазі не лише надійність СПСО, але й здатність досягати максимального результату за мінімально можливих витрат. Ідеальним підходом є баланс між значеннями показників надійності та показників економічної ефективності, що забезпечує необхідний рівень безпеки без надмірного фінансового навантаження.

Проблематика підвищення ефективності експлуатування СПСО становить предмет активного вивчення та ґрунтовного аналізу в межах значної кількості наукових досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Зокрема, робота [5] присвячена обґрунтуванню методів оцінювання ефективності функціонування СПСО та характеристики особливостей цих методів. Дослідження [6] акцентує увагу на проблемних питаннях створення протипожежного захисту ОКІ з урахуванням необхідності реагування на початковій стадії розвитку пожежі. У наукових працях [7-10] наголошується на критичній важливості надійності та функціональної стійкості СПСО для гарантування безпеки та мінімізації значних економічних збитків. В роботах [11,12] аналізується проблема низької надійності СПСО у високорозвинених країнах, зокрема, досліджується феномен значної кількості хибних спрацювань, які генеруються цими системами. Дослідження [13] присвячене аналізу та оцінці показників надійності СПСО. При цьому особливу увагу приділено значенню періодичного контролю технічного стану та регламентного ТО систем. Аналіз наукових публікацій [14-16] сфокусованих на проблематиці періодичності технічного обслуговування та контролю технічного стану ТС, свідчить про значну дослідницьку активність у цьому напрямі.

Здійснений аналіз наукових джерел свідчить про актуальність розробки нових підходів до

підвищення ефективності експлуатування СПСО (за рахунок оптимізації періодичності технічного обслуговування) на об'єктах зберігання АЗУ.

Метою статті є розробка методологічних підходів до оптимізації ТО СПСО, спрямованих на підвищення ефективності експлуатування цих систем.

Матеріали та методи

Для реалізації поставленої у статті мети було застосовано комплекс методів дослідження. Зокрема, використано метод теоретичного аналізу з метою оцінювання ефективності функціонування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ та визначення основних завдань їх експлуатування. Метод порівняння застосовано для виявлення подібних і відмінних характеристик між різними типами СПСО, що використовуються на ОКІ, а також для встановлення спільних ознак, властивих усім системам. Індуктивний та дедуктивний підходи були використані у процесі дослідження показників надійності роботи СПСО на об'єктах зберігання АЗУ. Метод формалізації дозволив обґрунтувати оптимальну періодичність проведення ТО СПСО. Засоби математичного моделювання застосовувалися під час розрахунково-теоретичного аналізу впливу ключових параметрів експлуатування СПСО на ймовірність безвідмовної роботи цих систем. Чисельні методи були використані для оцінки показників техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО. Графоаналітичний метод забезпечив побудову наочних графічних залежностей, що відображають взаємозв'язки між ключовими параметрами експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ.

Результати

Запропоновані підходи до оцінювання ефективності експлуатування СПСО базуються на моделі, представлений в роботі [4]. Модель побудовано із застосуванням напівмарковського випадкового процесу та дифузійного немоного закону розподілу відмов, з урахуванням семи станів, в яких перебуває СПСО на стадії життєвого циклу експлуатування. Представлена модель дає змогу, використовуючи статистичні дані експлуатування СПСО, розрахувати значення показника надійності (технічної ефективності) СПСО – коефіцієнта технічного використання (K_{me}) за формулою:

$$K_{me}(T) = \frac{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \varphi_{s_i}(T)}{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \eta_i(T)} \quad (1)$$

де $\varphi_{s_i}(T)$ – середній час перебування СПСО у справному стані;

$\eta_i(T)$ – середній час перебування СПСО у будь-якому стані $i = \overline{1,7}$;

$\pi_i(T)$ – частота потрапляння випадкового процесу до стану $i = \overline{1,7}$.

Показником економічної ефективності експлуатування СПСО пропонується обрати розмір питомих витрат на одиницю часу перебування СПСО у справному стані $C_{1\text{ num}}(T)$.

Фактичне значення $C_{1\text{ num}}(T)$ визначається з урахуванням статистичних даних експлуатування СПСО та матриці витрат Q для семи станів моделі. Елементи головної діагоналі Q_{ii} матриці витрат повинні відображати питомі витрати за одиницю часу перебування у відповідному стані, що не залежать від кількості або періодичності заходів, а лише від самого стану, та мають розмірність грн/рік. Недіагональні елементи Q_{ij} матриці витрат можуть бути не нульові тільки ті, що відповідають наявним (можливим) напрямом переходів між станами моделі експлуатування СПСО та мають розмірність грн. Тобто недіагональні елементи відповідають вартості за один перехід СПСО від одного стану до іншого.

Матриця витрат на експлуатування СПСО матиме вигляд:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & 0 & Q_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & 0 & Q_{33} & Q_{34} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{54} & Q_{55} & 0 & Q_{57} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{64} & 0 & Q_{66} & Q_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{77} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Витрати на перебування та вихід СПСО зі станів розраховуються за формулою:

$$C(T) = Q_{ii} \cdot \eta_i(T) + \sum_{j=1}^7 (\pi_j(T) \cdot Q_{ij}). \quad (3)$$

На підставі матриці (2) та формули (3) можливо визначити значення $C_{1\text{ num}}(T)$ за формулою:

$$C_{1\text{ num}}(T) = \frac{C_{\text{num сep}}(T) \cdot \eta_{\text{сep}}(T)}{\pi_i(T) \cdot \eta_i(T)} \quad (4)$$

де $C_{\text{num сep}}(T)$ – середні питомі витрати (загальні) за одиницю календарного часу експлуатування СПСО, грн/год;

$\eta_{\text{сep}}(T)$ – середній час одного переходу НМП.

Для проведення розрахунків значення $C_{1\text{ num}}(T)$ необхідно розрахувати $C_{\text{num сep}}(T)$ за формулою:

$$C_{\text{num сep}}(T) = \frac{\sum_{i=1}^7 (C_i(T) \cdot \pi_i(T))}{\eta_{\text{сep}}(T)},$$

$$\text{де } \eta_{\text{сep}}(T) = \sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \eta_i(T).$$

При цьому, значення $\pi_i(T)$ визначається за формулою:

$$\pi_i(T) = \sum_{j=1}^7 (\pi_j(T) \cdot P_{ij}(T)),$$

а значення $\eta_i(T)$ за формулою:

$$\eta_i(T) = \sum_{j=1}^7 P_{ij}(T) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{ij}(t).$$

Таким чином, за результатами проведених досліджень, з урахуванням статистичних даних та реальних умов експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, можливо визначити фактичні значення показника надійності (технічної ефективності) СПСО – коефіцієнта технічного використання $K_{\text{те}}(T)$ за формулою (1), та показника економічної ефективності – питомих витрат на одиницю часу перебування СПСО у справному стані $C_{1\text{ num}}(T)$ за формулою (4).

Обговорення

В контексті завдання оптимізації техніко-економічних параметрів експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, базуючись на моделі, представлений в роботі [4], проведено дослідження впливу періодичності ТО цих систем на різні показники ефективності експлуатування СПСО: за критерієм максимального значення показника надійності (технічної ефективності) СПСО – $K_{\text{те}}(T)$, за критерієм мінімального значення показника економічної ефективності – $C_{1\text{ num}}(T)$ та за “змішаним” критерієм (техніко-економічної ефективності), при якому досягається мінімально можливе значення $C_{1\text{ num}}(T)$ при значенні $K_{\text{те}}(T)$, не нижче, ніж гранично допустиме. Дослідження проведено на основі статистичних даних експлуатування СПСО. При цьому враховані фіксовані значення параметрів дифузійного немонотонного закону розподілу часу наробітку СПСО на відмову, які становлять: параметр масштабу – 1460 год, параметр форми – 0,75.

Для розрахунку показника надійності (технічної ефективності) СПСО – максимального значення $K_{\text{те}}(T)$, знайдено похідну від $K_{\text{те}}(T)$ по періодичності проведення ТО СПСО та прирівняно її до нуля. Момент перетину $dK_{\text{те}}(T)/dT$ лінії нуля відповідає найвищому значенню $K_{\text{те}}(T)$. Результати проведених розрахунків значення показника надійності (технічної ефективності) $K_{\text{те}}(T)$ при фіксованих значеннях експлуатаційних параметрів СПСО наведено на рис. 1. Отримані результати демонструють, що максимальне значення $K_{\text{те}}(T)$ СПСО дорівнює 0,916 та відповідає оптимальній періодичності $T_{\text{опт1}}$ проведення ТО СПСО за критерієм $K_{\text{те}}(T) \rightarrow \max$, що становить 1 раз на 771 годину (приблизно 1 раз на місяць).

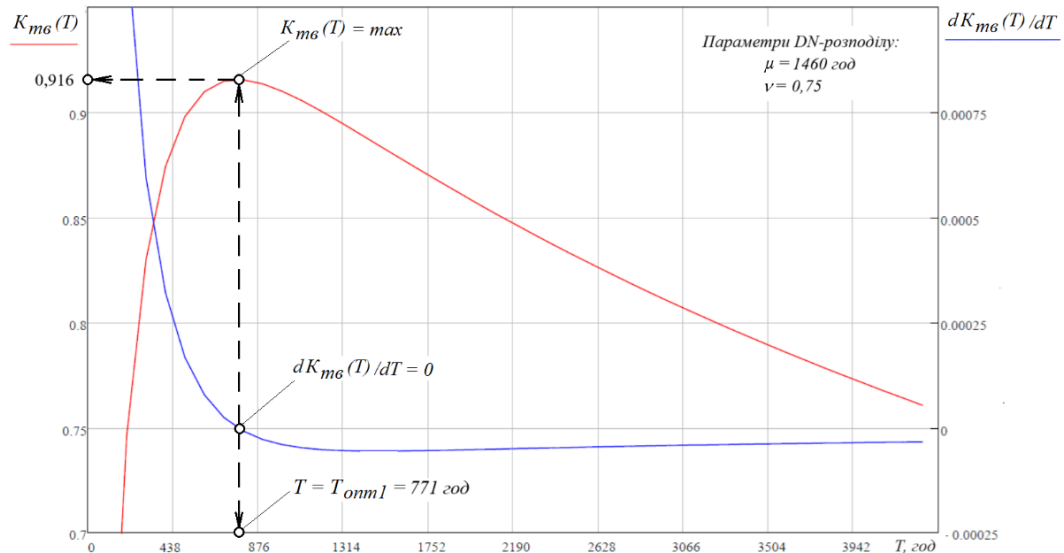


Рисунок 1 – Максимальне значення коефіцієнта технічного використання СПСО

Зазначений підхід до оцінювання ефективності експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ є доречним в умовах підвищених вимог до надійності системи, де пріоритетною метою виступає забезпечення максимального рівня технічної ефективності СПСО, що верифікується величиною показника надійності K_{mt} , незважаючи на обсяг фінансових витрат, необхідних для його реалізації.

Для розрахунку показника економічної ефективності СПСО – мінімального значення

$C_{1num}(T)$, знайдено похідну по періодичності проведення ТО СПСО від $C_{1num}(T)$ та прирівняно її до нуля. Момент перетину $dC_{1num}(T)/dT$ лінії нуля відповідає найнижчому значенню $C_{1num}(T)$. Результати проведених розрахунків мінімального значення $C_{1num}(T)$ при фіксованих значеннях експлуатаційних параметрів СПСО наведено на рис. 2.

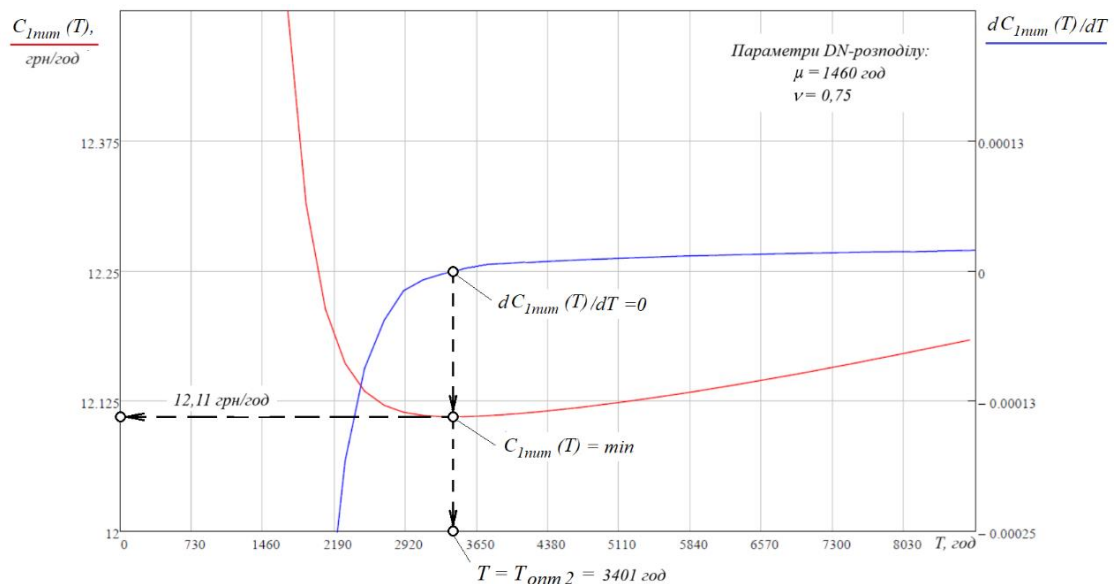


Рисунок 2 – Мінімальне значення питомих витрат на одиницю часу перебування СПСО у справному стані

Отримані результати (див. рис. 2) демонструють, що мінімальне значення $C_{1num}(T)$ дорівнює 12,11 грн/год та відповідає оптимальній періодичності T_{opt2} проведення ТО СПСО за критерієм $C_{1num}(T) \rightarrow \min$, що становить 1 раз на 3401 годину (приблизно 1 раз на 4,5 місяці).

Зазначений підхід є обґрунтованим для застосування лише в умовах, коли пріоритетною задачею виступає забезпечення економічної ефективності, а максимальні вимоги до надійності СПСО не висувуються.

Графічне відображення результатів отриманих залежностей $C_{1num}(T)$ та $K_{mt}(T)$ від періодичності

проведення ТО СПСО за “змішаним” критерієм оптимізації, що характеризує техніко-економічну ефективність експлуатування СПСО, при

фіксованих експлуатаційних параметрах та різних рівнях надійності СПСО представлено на рис. 3.

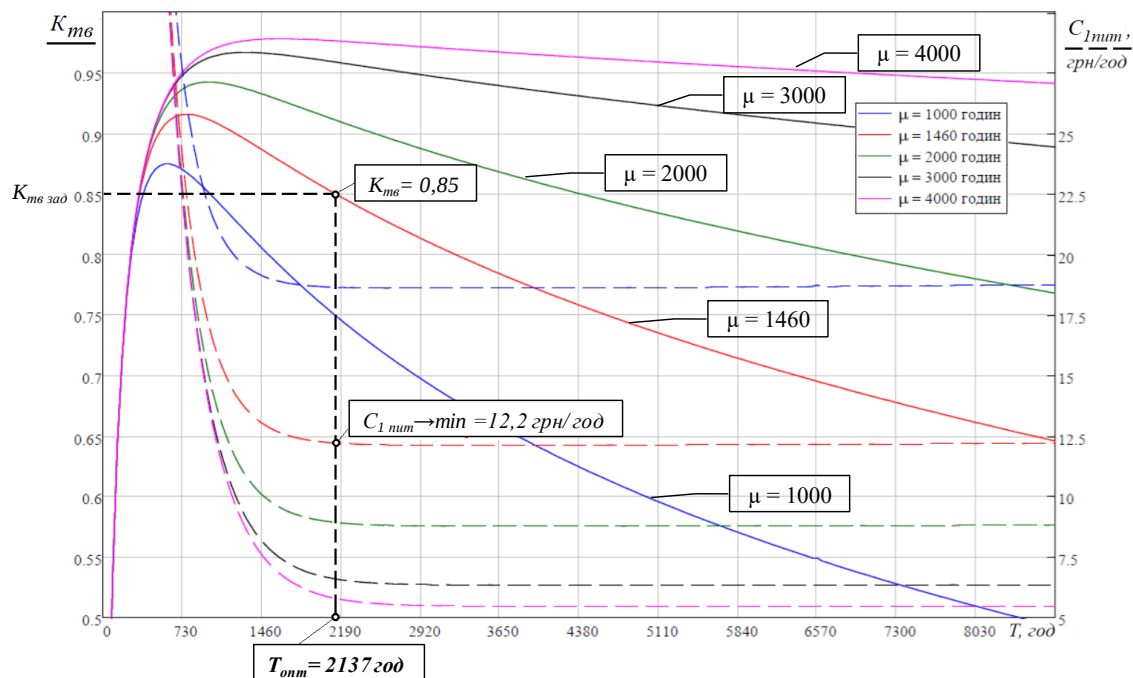


Рисунок 3 – Залежності $C_{1\text{ num}}(T)$ та $K_{mv}(T)$ від періодичності проведення ТО за “змішаним” критерієм оптимізації при фіксованих експлуатаційних параметрах та різних рівнях надійності СПСО

Оцінка показників техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО за “змішаним” критерієм, при якому досягається мінімальне значення показника економічної ефективності – $C_{1\text{ num}}(T)$ при максимальному значенні показника надійності (технічної ефективності) СПСО – $K_{mv}(T)$ (не нижчому, ніж гранично допустиме значення), свідчить (див. рис. 3), що якщо за заданий, мінімально прийнятний рівень показника надійності СПСО прийняти значення коефіцієнта технічного використання 0,85, то оптимальною є періодичність проведення ТО СПСО один раз на 2137 год (приблизно 1 раз на три місяці).

Даний підхід є цілком обґрунтованим у випадках, коли ключовим є досягнення заданого рівня безпеки за рахунок оптимальної техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО. Використання зазначеного підходу дасть змогу при питомих витратах на одиницю часу перебування СПСО у справному стані $C_{1\text{ num}}$, наближених до мінімальних, гарантувати необхідний ступінь технічної ефективності системи, що верифікується підтриманням показника надійності K_{mv} на рівні, який відповідає або перевищує гранично допустиме значення.

Результати, отримані в ході проведених досліджень, створюють міцну емпіричну та теоретичну базу для формування науково обґрунтованих практичних рекомендацій, які можуть бути успішно імплементовані в практичну діяльність військ для підвищення ймовірності безвідмовної роботи СПСО на об'єктах зберігання

АЗУ, що у довгостроковій перспективі сприятиме підвищенню рівня захисту цих об'єктів від виникнення НС.

Висновки

У статті представлено методичні підходи до оцінювання техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, що дають змогу комплексно враховувати не лише техніко-експлуатаційні характеристики функціонування систем, але й фінансово-економічні чинники, пов'язані з їх використанням.

Отримані результати можуть бути спрямовані на підвищення ефективності експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, що сприятиме підвищенню рівня захисту цих об'єктів, зниженню ризику ескаляції пожеж до масштабів НС, а також мінімізації матеріальних втрат і загрози для життя та здоров'я людей.

Список використаних джерел

1. Аветісян В.Г., Сенчихін Ю.М. Обґрунтування вихідних даних для розрахунку сил та засобів пожежогасіння на об'єктах з наявністю боєприпасів та вибухових речовин. Збірник наукових праць “Проблеми надзвичайних ситуацій”. Харків: НУЦЗУ. 2018. № 27. С. 3–9.
2. Убайдуллаєв Ю.Н., Гаврилюк А.О., Полтораченко А.І. Моделювання розвитку надзвичайної ситуації на арсеналах, базах, складах зберігання боєприпасів. Збірник наукових праць “Управління розвитком складних систем”. Київ: КНУБА. 2019. № 37. С. 60–65.
3. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 45 с.

4. Авраменко О.В., Сарапін Ю.О., Яблонський П.М., Федоров О.В. Визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування системи пожежної сигналізації та оповіщення на військових об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження). Науково-практичний журнал "Повітряна міць України". Київ: НУОУ, 2024. № 2 (7). С. 96–105.
5. Несенюк Л.П., Савченко О.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Київ: ІДУ НД ЦЗ, 2022. № 2 (14). С. 134–142.
6. Жартовський С.В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об'єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із целюлозовмісних матеріалів. Науковий вісник НЛТУ. Львів: НЛТУ. 2017. № 10. С. 101–105.
7. Suralaga F., Sari N, Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No 1. P. 143–155.
8. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penyebab terjadi false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknik. 2024. Vol. 9. No 1. P.79–88.
9. Yadav V., Mulani A., Deshmane D., Kalburgi B. 360 Degree Rotating Fire Protection System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol. 3. No 12. P. 133–138.
10. Wang Y., Tan H. Design and implementation of a distributed fire monitoring and alarm system based on LoRa. Journal of Physics:Conference Series. 2023. No 2674.
11. Marzec M., Kuskowski J. False Alarms in the Decision Support System of the State Fire Service. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 134–145.
12. Pietrzak M., Chmiel M., Feltynowski M. Analysis of the Problem of False Fire Alarms Generated by Fire Alarm Systems in Poland and Other Selected Countries. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 118–132.
13. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No 57. P. 2036–2040.
14. Авраменко О.В., Опенько П.В., П'явчук О.О., Целищев Ю.П., Яблонський П.М. Визначення періодичності проведення технічного обслуговування виробів військової техніки, що експлуатуються за технічним станом, з використанням дифузійно-монотонного закону розподілу. The Scientific Heritage. Budapest, Hungary, 2021. Vol. 3, No 66. P. 41–47.
15. П'явчук О.О., Дуленко Д.І., Іванов В.І., Целищев Ю.П. Оцінювання техніко-економічної ефективності експлуатування авіаційних засобів ураження. Науково-практичний журнал "Повітряна міць України". Київ: НУОУ, 2025. № 1 (8). С. 84–91.
16. V. Lukianchuk, B. Lanetskii, H. Khudov, O. Zvieriev, I. Terebuha, V. Kuprii, K. Borisenko, A. Artemenko, O. Aristarkhov, Y. Kondratenko. Development of the combined method for evaluating and controlling the reliability indicator "probability of failure-free switching" of a radio technical complex. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1. No 9(109). P.6–17.

¹Oleksandr Avramenko (doctor of technical sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0003-1358-1185>

¹Yurii Sarapin

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

¹Petro Yablonskyi (candidate of technical sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

²Oleksii Fedorov

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Ivan Kozhedub National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

APPROACHES TO ASSESSING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF FIRE ALARM AND NOTIFICATION SYSTEMS AT AVIATION EQUIPMENT STORAGE FACILITIES

Ensuring the continuous functioning of fire alarm and notification systems at aircraft weapons storage facilities is considered one of the key elements of a set of preventive measures aimed at preventing fires from developing to the level of emergencies. Increased requirements for the reliability of these systems necessitate the search for new, scientifically based approaches to assessing their effectiveness and increasing the probability of failure-free operation.

The article substantiates approaches to assessing the efficiency of fire alarm and notification systems, which are aimed at optimizing the frequency of their maintenance. The use of the proposed approaches allows you to maximize the value of the reliability indicator of these systems, minimize the financial and economic costs associated with their maintenance, or achieve the optimal balance between minimum costs and the maximum permissible level of system reliability.

The application of the developed methodological approaches to assessing the effectiveness of fire alarm and notification systems will allow for more accurate forecasts and informed management decisions regarding the operation of these systems. In the long term, this will contribute to increasing the level of protection of aircraft weapons storage facilities from possible emergencies.

Keywords: emergency; protection; safety; critical infrastructure facilities; threat; risk; system; model; probability of failure-free operation; statistical data; economic efficiency; reliability requirements; reliability indicators; evaluation of reliability indicators; technical condition monitoring; maintenance.

References

1. Avetisian V.H., Senchykhin Yu.M. Obgruntuvannia vykhidnykh danykh dlia rozrakhunku syl ta zasobiv pozhezhohasinnia na ob'ekтах z naiavnistiu boieprypasiv ta vybukhovyykh rehovyn. Zbirnyk naukovykh prats "Problemy nadzvychainykh sytuatsii". Kharkiv: NUTsZU. 2018. No 27. S. 3–9.
2. Ubaidullaev Yu.N., Havryliuk A.O., Poltorachenko A.I. Modeliuvannia rozvytku nadzvychainoi sytuatsii na arsenalakh, bazakh, skladakh zberihannia boieprypasiv. Zbirnyk naukovykh prats "Upravlinnia rozvytkom skladnykh system". Kyiv: KNUBA. 2019. No 37. S. 60–65.
3. DSTU ISO 9000:2015. Systemy upravlinnia yakistiu. Osnovni polozhennia ta slovnyk terminiv. [Chynnyi vid 2016-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2016. 45 s.
4. Avramenko O.V., Sarapin Yu.O., Yablonskyi P.M., Fedorov O.V. Vyznachennia optymalnoi periodychnosti tekhnichnoho obsluhovuvannia systemy pozhezhnoi sygnalizatsii ta opovischuvannia na viiskovykh ob'ekтах zberihannia boieprypasiv (aviatsiinykh zasobiv urazhennia). Naukovo-praktychnyi zhurnal "Povitriana mits Ukrainy". Kyiv: NUOU, 2024. No 2 (7). S. 96–105.
5. Nesenjuk L.P., Savchenko O.V., Nizhnyk V.V., Nikulin O.F. Metody otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia system protypozhezhnoho zakhystu. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. Kyiv: IDU ND TsZ, 2022. No 2 (14). S. 134–142.
6. Zhartovskiy S.V. Problemni pytannia stvorennia systemy protypozhezhnoho zakhystu ob'ekta krytychnoi infrastruktury z pozhezhnoiu navantahoiu iz tselulozovmisnykh materialiv. Naukovyi visnyk NLTU. Lviv: NLTU. 2017. No 10. S. 101–105.
7. Suralaga F., Sari N, Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No 1. P. 143–155.
8. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penyebab terjadi false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknika. 2024. Vol. 9. No 1. P.79–88.
9. Yadav V., Mulani A., Deshmane D., Kalburgi B. 360 Degree Rotating Fire Protection System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol. 3. No 12. P. 133–138.
10. Wang Y., Tan H. Design and implementation of a distributed fire monitoring and alarm system based on LoRa. Journal of Physics:Conference Series. 2023. No 2674.
11. Marzec M., Kuskowski J. False Alarms in the Decision Support System of the State Fire Service. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 134–145.
12. Pietrzak M., Chmiel M., Feltynowski M. Analysis of the Problem of False Fire Alarms Generated by Fire Alarm Systems in Poland and Other Selected Countries. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 118–132.
13. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No 57. P. 2036–2040.
14. Avramenko O.V., Openko P.V., Piavchuk O.O., Tselishev Yu.P., Yablonskyi P.M. Vyznachennia periodychnosti provedennia tekhnichnoho obsluhovuvannia vyrobiv viiskovoi tekhniki, scho ekspluatuiutsia za tekhnichnym stanom, z vykorystanniam dyfuziino-monotonnoho zakonu rozpodilu. The Scientific Heritage. Budapest, Hungary, 2021. Vol. 3, No 66. S. 41–47.
15. Piavchuk O.O., Dulenko D.I., Ivanov V.I., Tselishev Yu.P. Otsiniuvannia tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti ekspluatuvannia aviatsiinykh zasobiv urazhennia. Naukovo-praktychnyi zhurnal "Povitriana mits Ukrainy". Kyiv: NUOU, 2025. No 1 (8). S. 84–91.
16. V. Lukianchuk, B. Lanetskii, H. Khudov, O. Zvieriev, I. Terebuha, V. Kuprii, K. Borisenko, A. Artemenko, O. Aristarkhov, Y. Kondratenko. Development of the combined method for evaluating and controlling the reliability indicator "probability of failure-free switching" of a radio technical complex. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1. No 9(109). P.6–17.

ДОСВІД ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ОПЕРАЦІЙ (АНТИТЕРОРИСТИЧНИХ, МИРОТВОРЧИХ, СИЛ ОБОРОНИ).

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-115-122

УДК 623.746-519

Oleksii Martyniuk (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-9160-3525>

Oleg Radko (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

Yevhen Honcharenko (Doctor of Philosophy)

<https://orcid.org/0000-0001-7654-6083>

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

THE REVOLUTIONARY IMPACT OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS ON MODERN WARFARE: AN ANALYSIS OF UKRAINIAN STRATEGIC AND TACTICAL INNOVATIONS

The use of unmanned aerial systems (UAVs) in Ukraine has acquired a revolutionary character, fundamentally changing the art of war. The purpose of this article is to analyze the key technological, institutional, and doctrinal innovations adopted by the Defense Forces of Ukraine (DFU). This study analyzes the revolutionary and strategic role of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Russo-Ukrainian war, which have fundamentally transformed modern warfare. The use of UAVs has become systematic and is responsible for approximately 80% of tactical damage, evolving from a mere reconnaissance aid into the primary means of fire damage, compensating for the shortage of classic artillery ammunition. The article highlights institutional and technological innovations implemented by Ukraine to achieve technological superiority. Key steps include the creation of the Unmanned Systems Forces and the launch of the "Drone Line" project, designed to scale UAV effectiveness. Particular attention is given to the unique capability of the Defense Forces of Ukraine (DFU) to execute asymmetric Deep Strike operations against critical military-economic assets in the aggressor's deep rear (e.g., oil refineries, airfields). The "Spiderweb" Case is detailed as a classic example of asymmetric action, demonstrating the use of the "Trojan Horse" concept, swarm attacks, and elements of Artificial Intelligence (AI) to inflict irreversible damage on strategic assets with minimal resources. Institutional support is also examined, specifically the role of the Brave1 defense technology cluster in accelerating technology from R&D to mass procurement, and the digitalization of logistics via the DOT-Chain Defense platform. The importance of global partnerships—such as the Drone Coalition (with commitments of €2.75 billion), the "Drone Deal" with the US, and the localization of Baykar Makina's production—is underscored as guaranteeing long-term technological support. In conclusion, the integration of technology, decisive asymmetric actions, and international support provides Ukraine with strategic resilience and serves as a decisive lesson for all modern armies on the future of warfare

Keywords: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Unmanned Systems Forces (USF); modern warfare; Deep Strike; Operation Spiderweb; defense technology.*

Introduction

The use of unmanned aerial systems (UAVs) by the Defense Forces of Ukraine (DFU) has become a decisive and revolutionary factor in modern warfare, fundamentally transforming the art of war. What began as a supplementary tool for reconnaissance has evolved into the primary means of fire damage? This qualitative leap is quantified by the fact that drones are now responsible for approximately 80% of all damage inflicted at the tactical level [1].

This transformation was not accidental but an asymmetric response to battlefield conditions, specifically the shortage of classic artillery ammunition. This necessity forced a doctrinal shift, effectively leveling the enemy's superiority in heavy weapons. The critical importance of this shift is emphasized by the state, including the President and the Ministry of

Defense, who have prioritized the development of domestic defense-tech and a massive increase in production capacity.

Ukraine has become a global testing ground for unmanned innovations, leading to new military doctrines and striking organizational steps, such as the creation of the Unmanned Systems Forces [2] and the "Drone Line" project [3].

The purpose of this article is to analyze the advanced technologies and innovative concepts implemented by the DFU. The analysis is structured into five key areas:

1. Innovation in production and scaling of best practices.
2. Inflicting damage on enemy objects in the deep rear (Deep Strike).
3. Institutional and financial innovations.

4. Countering enemy UAVs (C-UAS) and the development of interceptor drones.

5. International cooperation in the field of UAVs.

The central thesis of this work is that this comprehensive and rapid integration of technology, decisive institutional action, and international support has provided Ukraine with strategic resilience and a technological superiority that serves as a lesson for all modern armies.

Materials and methods

This article employs a qualitative research methodology, specifically a descriptive and analytical review of documented strategic, tactical, and institutional innovations in the use of unmanned aerial systems by the DFU. The methodology follows an analytical synthesis approach, structuring the findings to assess the revolutionary impact of UAVs on modern warfare.

The materials for this analysis are drawn from open-source data provided in the source document, including official government communications, project websites, and summaries of operational results. The article adheres to the IMRAD (Introduction, Materials and methods, Results, Discussion) structure as recommended for scientific publications.

The scope of the analysis is defined by the five key areas of innovation listed in the introduction. The research method includes a specific case study of "Operation Spiderweb", which is used as a prime methodological example to illustrate the practical application of asymmetric action, technological ingenuity, and intellectual superiority.

Results

The results of the analysis demonstrate a multifaceted and highly adaptive ecosystem for UAV warfare. This ecosystem is built upon rapid domestic production, advanced strategic strike capabilities, and agile institutional frameworks.

Innovation in Production and Scaling: The Bravel Cluster

A cornerstone of Ukraine's technological acceleration is the Bravel Defense Technology Cluster, established in 2023 [4]. It functions as the only state coordination platform designed to critically accelerate the path of military technology from an innovative idea (R&D) to mass state procurement and effective application at the front. It achieves this by consolidating the efforts of developers, the military, the government, and investors.

The key mechanisms of the cluster include:

- **Stimulating Innovation:** The Bravel platform has registered over 2000 developments, with more than 20% in the field of UAVs. This portfolio covers a wide spectrum, from FPV drones and bombers to reconnaissance systems and C-UAS interceptor drones.

- **Funding and Codification:** Bravel provides grant support for promising projects (up to UAH 150 million). More critically, it ensures their codification (admission to operation). This is a critical stage that allows the state to purchase already proven and

standardized technologies, bypassing traditional bureaucratic bottlenecks.

- **Direct Integration with Troops:** The Bravel Market serves as a direct-action marketplace, or a catalog of innovative defense technologies. This allows military units to directly order UAVs, ground robots, EW assets, and AI modules from Ukrainian manufacturers.

Bravel serves as the institutional engine that ensures Ukrainian technological leadership is quickly transformed into a tangible combat advantage at the front.

Strategic Deep Strike Capabilities

A primary result of this innovation is the DFU's acquired and unique capability to plan and conduct operations to destroy high-value targets in the deep rear of the Russian Federation. These consistent and effective measures are aimed at a single strategic logic: to degrade the military-economic potential of the aggressor.

Targets are not tactical, but strategic nodes that support the war:

- Oil Refining Infrastructure: Strikes focus on critical primary processing units, disabling significant capacity;

- Military Airfields and Arsenals: Targeting strategic aviation bases and ammunition depots;

- Logistics and Production: Damaging military factories and critical infrastructure hundreds of kilometers from the front line.

This capability is enabled by two technological pillars:

1. **Domestic Long-Range UAVs:** Ukraine shifted from standard commercial drones to developing and scaling its own fixed-wing, aircraft-type UAVs. Examples include the "Beaver," "UJ-22 Airborne," and "AQ-400 Scythe" series, all capable of covering distances greater than 1000 km. (see Fig. 1).

2. **Hybrid Guidance Systems:** To overcome powerful enemy electronic warfare and GPS jamming, these UAVs utilize hybrid navigation. They rely on inertial navigation systems (INS) and alternative methods, such as navigation by digital terrain map, to minimize reliance on GPS, especially in the final phase of the mission. This makes them significantly less vulnerable to enemy EW.

Case Study: Operation "Spiderweb"

Operation "Spiderweb" (see Fig. 2) has become a classic precedent in modern military history, demonstrating the DFU's unique asymmetric capabilities. This operation, conducted on June 1, 2025, destroyed a significant portion of Russia's combat-ready strategic aviation and illustrates key innovations that are already being included in military textbooks.

Operational-Tactical Innovations (Asymmetry):

- "Trojan Horse" Concept: The key asymmetric advantage was the method of strike. Instead of launching drones from Ukraine, the SSU smuggled dozens of attack UAVs deep into the Russian Federation. They were hidden in special containers

disguised as commercial cargo (sections of modular houses) and transported on ordinary trucks;



Figure 1. Long-range UAVs made in Ukraine. [5]

Proximity Launch: The drones took off directly near the target airfields. This minimized the reaction time of Russian air defense, which was postured to detect long-range, high-altitude targets, not small drones appearing kilometers away;

Coordinated Swarm Strike: The operation employed the principle of "swarm warfare". Over 100 small drones, mainly FPVs, were used simultaneously against four strategic air bases. The number, low cost, and minimal radar visibility of these small drones completely overloaded traditional air defense systems;

Efficiency: The ratio of damage caused to resources used was impressive. With cheap drones and intelligent logistics, aviation assets worth billions of US dollars were destroyed or damaged.

Technological Ingenuity:

Autonomy: The drone swarms were controlled remotely using the open-source ArduPilot autopilot system. This allowed for autonomous flight to pre-set GPS coordinates, minimizing the impact of EW.

AI Guidance: According to reports, drone algorithms were trained on bomber images to autonomously recognize and aim at the most vulnerable points, such as fuel tanks in the wings. This provided high accuracy and maximum destructive power.

Network Exploitation: The drones were coordinated through conventional Russian telecommunications networks (mobile communications), exploiting a vulnerability created by security services not disconnecting communications at secret military facilities.

The strategic impact of "Spiderweb" was profound. It caused irreversible damage to Russian long-range aviation, as the destroyed bombers (Tu-95MS, Tu-22M3) have not been mass-produced for decades. It demonstrated that swarms of cheap UAVs

can effectively neutralize expensive, manned strategic aviation, forcing a global reassessment of strategic asset protection.

Institutional and Financial Innovations

The effectiveness of these drones is supported by deep institutional and financial reforms aimed at maximizing supply speed and supporting domestic producers.

The "Drone Line" Project:

Initiated by the President, this project is a revolutionary step aimed at scaling the most effective unmanned systems. Its key tasks are:

1. Creation of a "Killzone": To form a continuous "killzone" 10-15 km deep, making it impossible for the enemy to advance without significant losses.
2. Infantry Air Escort: To provide units with constant air reconnaissance and fire cover to destroy targets before they reach friendly positions.
3. Scaling Experience: To identify and scale the unique combat experience of the best drone units across all branches of the military.

A key innovation in this project is simplified recruiting. The Ministry of Digital Transformation [7] launched the "Drone Line" service in the Diia application, allowing candidates to apply directly to top units without queues or paperwork.

Priority Funding and Procurement:

The government has confirmed the financial priority of technological weapons. As of July 2025, the Defense Procurement Agency had state contracts for unmanned systems valued at UAH 99.3 billion. In the first seven months of 2025, the Agency contracted three times more UAVs than in all of 2024. Critically, more than 95% of these contracted UAVs are Ukrainian-made [8].

Digitalization of Procurement (DOT-Chain Defense) [9]:

To eliminate bureaucratic obstacles, the innovative digital platform DOT-Chain Defense was launched. This system works as a modern "weapons marketplace". Its unique feature is a rating system, where military personnel can evaluate ordered drones and leave feedback on their combat use. This provides direct feedback to manufacturers, helps units make informed choices, and gives the state a clear view of real frontline needs.

Simplified Logistics:

A key achievement was the simplification of internal military procedures. UAVs, systems, and ammunition for them are now written off only under the act of write-off as a result of launch. This eliminates the need for extensive paper documents and frees operator time for combat missions [10].

Countering Enemy UAVs (C-UAS)

In response to enemy drone threats, Ukraine is actively developing its own interceptor drones,

forming a new type of troops in the Air Force for unmanned air defense. This development has progressed through stages:

Stage 1: FPV kamikaze drones, used to destroy enemy reconnaissance and strike drones at short distances.

Stage 2: Aircraft-type interceptor drones, which have longer range and speed.

Stage 3: Specialized interceptors, developed specifically to counter loitering munitions like the Shahed-type.

These interceptor drones (see Fig. 3) use diverse technologies, including: physical damage (ramming or dropping nets), kinetic ammunition (such as the Ukrainian Drone Hunter equipped with two 12-caliber barrels), electronic counteraction to "jam" the control signal, and AI integration for autonomous detection, capture, and tracking.



Figure 2. Results of "Spiderweb" Operation [6]

International Cooperation

Ukraine's domestic innovation is amplified by active international cooperation focused on joint production, funding, and technology exchange.

Multilateral Drone Coalition:

This is one of the most important initiatives launched within the "Ramstein format". Led by Latvia and the United Kingdom, it unites about 20 partner countries (including Australia, Canada, Germany, Sweden) [12]. The coalition's strategic goal is the large-scale supply of UAVs. Participating countries have committed at least €2.75 billion to support this effort during 2025. This includes the planned supply

of approximately 35,000 interceptor drones to combat Russian Shaheds.

Strategic Bilateral Partnerships and Localization:

Ukraine has moved beyond simple procurement to joint production and technology localization:

United States: A long-term "Drone Deal" [13] is being negotiated. This 5-year agreement concerns the purchase of Ukrainian drones and the possibility of joint production of a number of Ukrainian UAVs;

Turkey: The Turkish company Baykar Makina is implementing a project to build a plant in Ukraine for the production and maintenance of UAVs like the Bayraktar TB2 and Akinci [14];

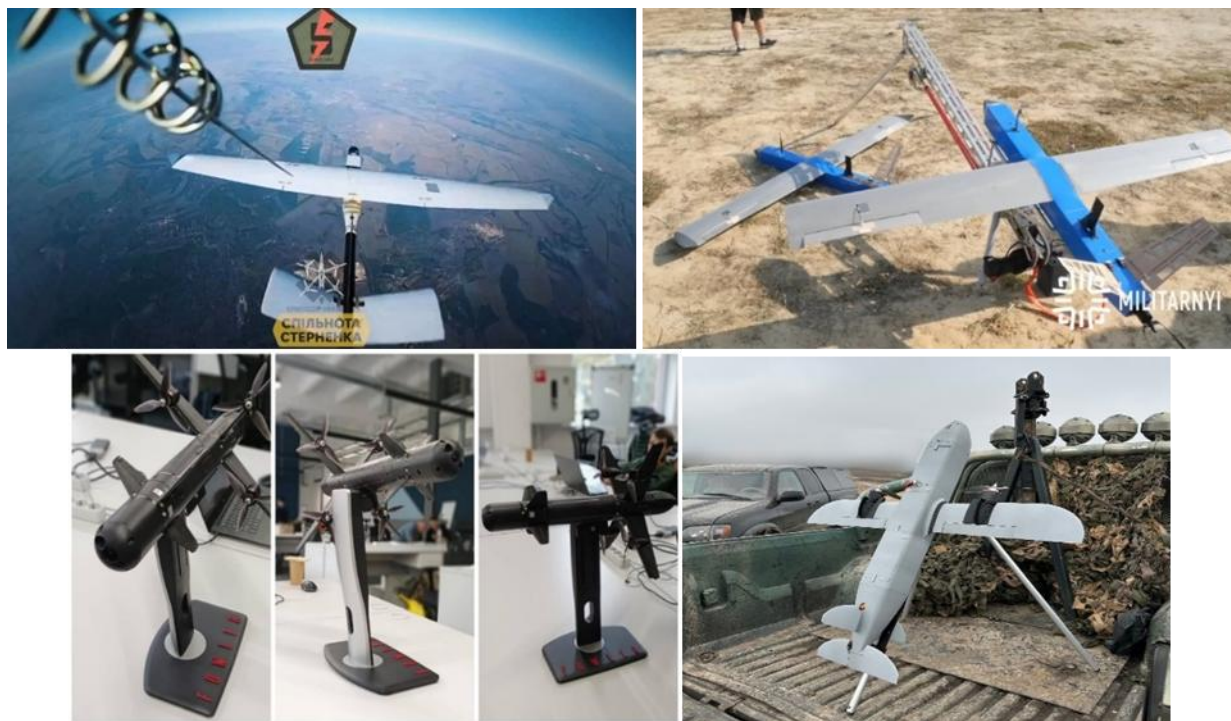


Figure 3. Different types of interceptor drones [11].

Netherlands: Through the "Build with Ukraine" initiative, €110 million in investments will be used to launch joint production of deep-strike UAVs [15];

United Kingdom: The LYRA program establishes cooperation in the development and scaling of defense technologies, including bombs and interceptor drones [16];

Specialized Localization: Cooperation extends to maritime systems, with Norway's Kongsberg opening an office in Kyiv for the joint production of unmanned surface vehicles (marine drones). An agreement was also signed with the American company AeroVironment for the phased localization of Switchblade 600 kamikaze drones.

Discussion

The results presented confirm that UAVs have become a revolutionary and decisive factor in modern warfare. The discussion of these results can be framed by the three key lessons Ukraine's experience offers to the world.

Lesson 1: Doctrinal and Budgetary Transformation.

The "80% rule" is not just a statistic; it signifies a complete doctrinal shift. Drones have become an asymmetric replacement for expensive artillery. This implies that the traditional NATO funding priority, focused on expensive, low-volume platforms, is outdated. The new doctrine requires a "junk layer" of cheap, mass-produced, and expendable UAVs.

Furthermore, the success of Ukrainian deep-strike drones proves that the "safe zone" or deep rear has disappeared. Not a single fixed, high-value infrastructure asset (air base, port, logistics hub) is secure. This demands a complete reassessment of physical and electronic security for all strategic objects.

Finally, the traditional bureaucratic procurement cycle (5-10 years) is incompatible with the pace of technological warfare, where changes occur every 3-6 months. The success of Brave1 shows that NATO countries must establish similar mechanisms to rapidly codify and integrate commercial, AI-driven solutions within months, not years.

Lesson 2: Technological Imperatives – Autonomy and C-UAS.

The results show that the modern frontline is a "GPS-Free War". The heavy use of EW means that no GPS-dependent UAV can survive. The only path to successful deep strikes is through autonomy, specifically inertial navigation systems (INS) and onboard artificial intelligence (computer vision). This implies that investment in Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS) is no longer a future concept but a present-day necessity.

Conversely, a critical gap in C-UAS has been exposed. Expensive anti-aircraft missile systems are economically unprofitable and technically ineffective against swarms of cheap FPV drones. The priority for all modern armies must be the creation of a Multi-Level C-UAS System, combining short-range (trench) EW, laser/kinetic systems for swarms, and micro-air defense systems using interceptor drones.

Lesson 3: Institutional Adaptation.

The "Spiderweb" case and the creation of the USF prove that technological ingenuity and intellectual superiority are decisive. This requires institutional adaptation. The creation of a separate branch of forces – the Unmanned Systems Forces – is a necessary organizational innovation. It ensures centralized doctrine, development, and lobbying for technological needs.

Logistics must also be digitized. Bureaucracy and long supply chains are an advantage for the enemy. Ukraine's response launching DOT-Chain Defense and simplifying write-off procedures is a model for all allies. A digitized "Markeplace Model" with a feedback/rating system is critical to reduce delivery times and integrate real combat lessons.

Conclusions

UAVs have become a key factor in Ukraine's strategic resilience and have fundamentally reshaped the modern art of war. The set of measures taken by the Defense Forces of Ukraine has provided technological superiority and strategic resilience.

The conclusions of this analysis are threefold:

1. Tactical and Operational Dominance: Drones have become the main means of fire damage (~80% of hits), providing an asymmetric response to ammunition shortages. The creation of the Unmanned Systems Force and the "Drone Line" project consolidates this new doctrine and scales best practices.

2. Strategic Asymmetric Influence: The DFU has acquired a unique Deep Strike capability to destroy strategic targets in the enemy's deep rear (refineries, airfields). The "Spiderweb" case became a classic precedent for how technological ingenuity (swarm strikes, AI, "Trojan Horse" logistics) can achieve maximum effect with minimal forces, causing irreversible damage to strategic assets.

3. Institutional and International Support: The Bravel technology accelerator has streamlined the path from R&D to mass procurement. Digital platforms like DOT-Chain Defense provide transparent financing and rapid delivery. This domestic success is guaranteed long-term support by the global Drone Coalition (€2.75 billion) and strategic joint-production agreements with the US ("Drone Deal"), UK (LYRA), and Turkey (Baykar).

Thus, UAVs are not just a type of weapon, but a key tool shaping the new world order in the military sphere. The Ukrainian integration of technology, decisive action, and international support provides a lesson in resilience and effective resistance for all modern armies.

References

1. "Ukrainskyi OPK maie spromozhnosti dlia vyrobnytstva 10 milioniv droniv na rik – Oleksandr Kozenko na bezpekovomu forumi v Sinhapuri," Ministerstvo oborony Ukrainy, cherv. 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/ukrayinskij-opk-maye-spromozhnosti-dlya-virobnicztva-10-miljoniv-droniv-na-rik-oleksandr-kozenko-na-bezpekovomu-forumi-v-singapuri>.
2. Ukraina, Prezydent Ukrainy. (2024, Feb. 6). Ukaz Prezydenta Ukrainy No. 51/2024, "Pro naroshchuvannia spromozhnostei syl oborony". Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625>.
3. "Liniia Droniv," Ofitsiyni sait projektu "Liniia Droniv". Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://droneline.army.gov.ua/>.
4. "Bravel," Ofitsiyni sait klasteru Bravel. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://bravel.gov.ua/>.

5. Analysis of the use of UAVs in the Russian-Ukrainian conflict. [Online]. Available: <https://www.airmobi.com/uk/analyzing-the-application-of-uavs-in-the-russia-ukraine-conflict/?srsltid=AfmBOoo1uoTyveFpxLShxZgBUcGrjiHz67hHh>.

6. "Ukraine's SBU shares Cobweb drone strike footage targeting Russian bombers,". Accessed: June 4, 2025. [Online]. Available: <https://english.nv.ua/nation/operation-spiderweb-sbu-shows-most-vivid-footage-of-airfield-attacks-in-newly-released-video-50519546.html>.

7. Ofitsiyni sait Ministerstva tsyfrovoi transformatsii Ukrainy. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://thedigital.gov.ua/>.

8. "AOZ zakontraktuvav droniv-perekhopliuvachi na bilsh iak 3 mlrd hryven," Ahentsiia oboronnykh zakupivel, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://dpa.mod.gov.ua/page/aoz-zakontraktuvav-droniv-perexopliuvaci-na-bils-iak-3-mlrd-griven>.

9. "Ukraina zapuskaie DOT-Chain Defence – tsyfrovu systemu dlia shvydkoho postachannia ozbroiennia," Ministerstvo oborony Ukrainy, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-zapuskaye-dot-chain-defence-czifrovu-sistemu-dlya-shvidkogo-postachannya-ozbroiennya>.

10. "Spysannia tekhniky ta komplektuvannia BpLA stalo prostishym: shcho zminylos," Ministerstvo oborony Ukrainy, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/spisannya-tehniki-ta-komplektuvannya-bp-la-stalo-prostishim-shho-zminilos>.

11. The evolution of Ukrainian interceptor drones and their role in the war. [Online]. Available: <https://militarnyi.com/uk/articles/evolyutsiya-ukrayinskykh-droniv-perehoplyuvachiv-ta-yihnya-rol-u-vijni/>

12. "FPV, "bomber", "rozvidnyky": chym Koalitsiia droniv zabezpechuie Syly oborony dlia tekhnolohichnoi perevahy nad vorohom," Ministerstvo oborony Ukrainy, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/fpv-bomberi-rozvidniki-chim-koalicziya-droniv-zabezpechuye-sili-oboroni-dlya-tehnologichnoyi-perevagi-nad-vorogom>.

13. "Tekhnichna delehatsiia Minoborony Ukrainy provela peremovyny zi SShA shchodo uhody pro kupivliu ta vyrobnytstvo droniv," Ministerstvo oborony Ukrainy, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/tehnichna-delegacziya-minoboroni-ukrayini-provela-peremovini-zi-s-sha-shhodo-ugodi-pro-kupivlyu-ta-virobnicztvo-droniv>.

14. Zavod Baykar v Ukraini: zareiestrovana kompaniia ta prydbana zemelna dilianka," Militarnyi, 2022. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://militarnyi.com/uk/news/zavod-baykar-v-ukrayini-zareiestrovana-kompaniya-ta-prydbana-zemelna-dilyanka>

15. "Ukraina ta Niderlandy zapuskaiut spilne vyrobnytstvo daleko-biinykh BpLA u mezhakh initsiatyvy "Build with Ukraine"," Ministerstvo oborony Ukrainy, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-ta-niderlandi-zapuskayut-spilne-virobnicztvo-dalekobijnykh-bpla-u-mezhah-inicziativi-build-with-ukraine>.

16. "Ukraina ta Velyka Brytaniia posyliuiut oboronne partnerstvo," Ministerstvo oborony Ukrainy, 2025. Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-ta-velika-britaniya-posilyuyut-oboronne-partnerstvo>.

Мартинюк Олексій Ростиславович (кандидат технічних наук, доцент)
<https://orcid.org/0000-0001-9160-3525>

Радько Олег Віталійович (кандидат технічних наук, доцент)
<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

Гончаренко Євген Володимирович (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0001-7654-6083>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

РЕВОЛЮЦІЙНИЙ ВПЛИВ БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА СУЧАСНУ ВІЙНУ: АНАЛІЗ СТРАТЕГІЧНИХ ТА ТАКТИЧНИХ ІННОВАЦІЙ УКРАЇНИ

Це дослідження аналізує революційну роль безпілотних авіаційних систем (БАС) у російсько-українській війні, які набули стратегічного та систематичного характеру та докорінно змінили сучасне воєнне мистецтво. Встановлено, що на тактичному рівні дрони відповідають приблизно за 80% вогневого ураження, перетворившись з допоміжного засобу розвідки на головний інструмент завдання вогневих ударів в умовах дефіциту класичних боєприпасів. У статті висвітлено інституційні та технологічні інновації України, спрямовані на досягнення технологічної переваги. Серед ключових кроків — створення Сил безпілотних систем та запуск проєкту «Армія дронів», що масштабує ефективність БАС. Особливу увагу приділено унікальній здатності Сил оборони України (СОУ) завдавати асиметричних ударів у глибокому тилу противника (Deep Strike), спрямованих на підриг його військово-економічного потенціалу (нафтопереробні заводи, аеродроми). Як класичний приклад такої асиметрії детально розглянуто операцію «Павутина» (Spiderweb), що продемонструвала застосування концепції «Троянського коня», ройових атак та елементів штучного інтелекту для ураження стратегічної авіації. Досліджено інституційну підтримку, зокрема роль кластера Brave1 у прискореному доведенні технологій від ідеї до масової закупівлі, а також цифровізацію закупівель через платформу DOT-Chain Defense. Підкреслено важливість міжнародного співробітництва (Коаліція дронів, «Drone Deal» зі США, локалізація виробництва Baykar Makina), яке забезпечує довгострокову підтримку та інтеграцію українського Defense Tech у глобальний оборонний ланцюг. У висновках наголошується, що інтеграція технологій, рішучі асиметричні дії та міжнародна підтримка забезпечують Україні стійкість і слугують ключовим уроком для усіх сучасних армій.

Ключові слова: Безпілотний літальний апарат (БпЛА); Сили безпілотних систем (СБС); сучасна війна; глибинне ураження; Операція "Павутина"; оборонні технології.

Список використаних джерел

1. «Український ОПК має можливість для виробництва 10 мільйонів дронів на рік – Олександр Козенко на безпечному форумі в Сингапурі», Міністерство оборони України, черв. 2025. Доступ: 20 жовтня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://mod.gov.ua/news/ukrayinskij-opk-maye-spromozhnosti-dlya-virobnicstva-10-miljoniv-droniv-na-rik-oleksandr-kozenko-na-bezpekovomu-forumi-v-singapuri>.
2. Україна, Президент України. (2024, 6 лютого). Указ Президента України № 51/2024 Про нарощення можливостей сил оборони. Доступно: 20 жовтня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625>.
3. «Лінія Дронів», Офіційний сайт проєкту «Лінія Дронів». Доступно: 20 жовтня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://droneline.army.gov.ua/>.
4. «Brave1», Офіційний сайт кластера Brave1. Доступно: 20 жовтня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://brave1.gov.ua/>.
5. Аналіз використання БПЛА в російсько-українському конфлікті. [Онлайн]. Доступно: <https://www.airmobi.com/uk/analyzing-the-application-of-uavs-in-the-russia-ukraine-conflict/?srsltid=AfmBOo0luoTyveFpxLShxZgBUcGrjiHz67hNh>.

6. «СБУ України поширює відеозаписи удару безпілотника «Павутина», спрямованого на російські бомбардувальники». Дата звернення: 4 червня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://english.nv.ua/nation/operation-spiderweb-sbu-shows-most-vivid-footage-of-airfield-attacks-in-newly-released-video-50519546.html>.

7. Офіційний сайт Міністерства цифрової трансформації України. Дата звернення: 20 жовтня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://thedigital.gov.ua/>.

8. «АОЗ законтрактував дронів-перехоплювачів на більше як 3 млрд гривень», Агенція оборонних закупівель, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. Режим доступу: <https://dpa.mod.gov.ua/page/aoz-zakontraktuvav-droniv-perexopliuvaci-na-bils-iak-3-mlrd-griven>.

9. «Україна запускає DOT-Chain Defense – цифрову систему для швидкого постачання озброєння», Міністерство оборони України, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-zapuskaye-dot-chain-defence-czifrovu-sistemu-dlya-shvidkogo-postachannya-ozbrojennya>.

10. «Списання техніки та комплектування БрЛА стало простим: що змінилося», Міністерство оборони України, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://mod.gov.ua/news/spisannya-tehniki-ta-komplektuvannya-bp-la-stalo-prostishim-shho-zminilos>.

11. Еволюція українських безпілотників-перехоплювачів та їх роль у війні. [Онлайн]. Доступно: <https://militaryni.com/uk/articles/evolyutsiya-ukrayinskyh-droniv-perehoplyuvachiv-ta-yihnya-rol-u-vijni/>

12. «FPV, «бомбери», «розвідники»: чим Коаліція дронів забезпечує Силу оборони для технологічної перемоги над ворохом», Міністерство оборони України, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://mod.gov.ua/news/fpv-bomberi-rozvidniki-chim-koalicziya-droniv-zabezpechuye-sili-oboroni-dlya-tehnologichnoyi-perevagi-nad-vorogom>.

13. «Технічна делегація Міноборони України провела перемоги зі США щодо угоди про купівлю та виробництво дронів», Міністерство оборони України, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://mod.gov.ua/news/tehnichna-delegacziya-minoboroni-ukrayini-provela-peremovini-zi-s-sh-a-shhodo-ugodi-pro-kupivlyu-ta-virobnicztvo-droniv>.

14. Завод Байкар в Україні: зареєстрована компанія та придбана земельна ділянка, Військовий, 2022. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://militaryni.com/uk/news/zavod-baykar-v-ukrayini-zareyestrovana-kompaniya-ta-prydbana-zemelna-dilyanka>

15. «Україна та Нідерланди запускають спільне виробництво далеко-бійних BpLA у межах ініціативи «Build with Ukraine»» Міністерство оборони України, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025. [Онлайн]. В наявності: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-ta-niderlandi-zapuskayut-spilne-virobnicztvo-dalekobijnih-bpla-u-mezhah-inicziativi-build-with-ukraine>.

16. «Україна та Велика Британія посилюють оборонне партнерство», Міністерство оборони України, 2025. Доступ: 20 жовтня 2025 р. [Онлайн]. Доступно: <https://mod.gov.ua/news/ukrayina-ta-velika-britaniya-posilyuyut-oboronne-partnerstvo>.

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-123-132

УДК 629.7:338.45

Мальований Володимир Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Журід Володимир Іванович

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Капінос Микола Семенович (кандидат наук з державного управління)

<https://orcid.org/0000-0003-3932-1381>

Яковлев Руслан Петрович

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Стаття присвячена комплексному дослідженню сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів з акцентом на їхню економічну ефективність та інвестиційну привабливість, зокрема в контексті української дрон-економіки. В умовах глобальної технологічної волатильності, посилення ризиків GNSS-джемінгу та спуфінгу, а також стрімкого зростання ринку безпілотних літальних апаратів, традиційні навігаційні системи (GNSS, INS) демонструють значні недоліки, що призводить до зниження рентабельності інвестицій (ROI) нижче 10% у зонах конфліктів. У цьому контексті гібридні навігаційні системи, що інтегрують GNSS, INS, візуальну одометрію (VO), технології одночасної локалізації та картографування (SLAM) та алгоритми штучного інтелекту, виступають ключовим інструментом подолання цих обмежень. Метою роботи є економічне обґрунтування сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів як інструменту підвищення інвестиційної привабливості та стимулювання розвитку дрон-економіки України. Для досягнення мети запропоновано авторську концептуальну модель економічної оптимізації, яка інтегрує технічні параметри навігаційних систем (точність позиціонування, стійкість до перешкод) з фінансово-аналітичним моделюванням (NPV, IRR, ROI, CAPEX, OPEX). Модель включає чотири взаємопов'язані модулі: сенсорну інтеграцію, фінансове моделювання, адаптивне траскторне планування та врахування регуляторних факторів. Її математичне ядро базується на скоригованому показнику чистої теперішньої вартості ($NPV\sim adj$), що враховує коефіцієнт технічної ефективності ($\eta\sim tech$). В статті проведено порівняльний аналіз основних навігаційних методів (GNSS, INS, VO, SLAM, гібридні системи), визначено їхні техніко-економічні характеристики (точність, CAPEX, OPEX, ROI) та вплив на фінансові результати. Ідентифіковано ключові ризики для українського сектору безпілотних літальних апаратів (технологічні, фінансові, регуляторні, кадрові) та запропоновано комплекс практичних рекомендацій для державної політики, спрямованих на створення інвестиційного фонду, розвиток антиджемінгових навігаційних технологій з штучним інтелектом та гармонізацію нормативної бази з європейськими стандартами. Висновки підтверджують, що гібридизація навігаційних систем трансформує їх з технічного інструменту у високорентабельний інвестиційний актив, здатний забезпечити сталий розвиток національної дрон-економіки.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, навігаційні системи, гібридна навігація, візуальна одометрія, штучний інтелект, економічна ефективність, рентабельність інвестицій

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відбувається в умовах глобальної технологічної та економічної волатильності, коли інноваційна перевага безпосередньо визначає рівень конкурентоспроможності та економічної віддачі. Стрімке зростання ринку БПЛА, зокрема у

військово-промисловому, аграрному та логістичному секторах, супроводжується низкою системних викликів. Традиційні методи навігації – GNSS та INS демонструють високу вразливість у середовищах із джемінгом, дрейфом і низькою видимістю, що призводить до зниження ефективності місій та втрат інвестицій, які у зонах

конфліктів можуть сягати 25–30%. В українському контексті, де сектор безпілотників продемонстрував зростання на 15–18% у 2024 році, ризики посилюються впливом воєнного стану, міграцією інженерних кадрів та валютною турбулентністю. На глобальному рівні, попри прогнозований середньорічний темп зростання ринку (CAGR) близько 14%, проекти з морально застарілими навігаційними системами мають рентабельність (ROI) нижчу за 10%, що істотно знижує їх інвестиційну привабливість. У результаті формується суперечність: прогрес у сфері штучного інтелекту та сенсорних систем створює потенціал технологічного прориву, однак економічні бар'єри – високі витрати на впровадження (CAPEX/OPEX) і регуляторна фрагментація – обмежують масштаби його реалізації. Сучасні гібридні навігаційні системи, які інтегрують GNSS, INS, SLAM і алгоритми штучного інтелекту, виступають ефективним інструментом подолання цих обмежень. Вони забезпечують точність позиціонування до 0,1–0,5 м і дозволяють скоротити операційні витрати на 35–50%, що підтверджується міжнародними дослідженнями. У середньому такі рішення демонструють ROI на рівні 15–25%, що свідчить про їх високу економічну ефективність. Водночас питання комплексної економічної оцінки гібридних навігаційних систем залишається недостатньо розробленим. Нині відсутні узгоджені методики, які б інтегрували фінансово-економічні індикатори (NPV, IRR, ROI) з технічними характеристиками сенсорів, алгоритмів корекції, адаптивного планування траєкторій та регуляторних вимог. Це обумовлює необхідність створення економіко-математичного інструментарію для обґрунтування інвестицій у сучасні навігаційні технології БпЛА – критично важливого чинника забезпечення конкурентоспроможності та технологічної безпеки українського дрон-сектору у довгостроковій перспективі.

Матеріали та методи

Проблематика сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів (БпЛА) набуває особливої актуальності в умовах глобальної технологічної турбулентності, швидкого зростання ринку дронів та зростання ризиків, пов'язаних із GNSS-джемінгом, обмеженою видимістю й економічними витратами впровадження. Актуальні дослідження спрямовані на пошук оптимального балансу між технічною надійністю, обчислювальною ефективністю та економічною рентабельністю навігаційних систем, де інновації у сфері сенсорної інтеграції та штучного інтелекту поступово витісняють традиційні підходи.

Результати

Методи навігації БпЛА в умовах відсутності GNSS-сигналу систематизують І. Джаррайя, А. Аль-Бататі, М. Б. Кадрі та співавтори [1]. Дослідження охоплює аналіз обчислювальної складності, методологій сенсорної ф'южн і локалізації, зокрема інерційну навігацію (INS), візуальну одометрію (VO) та SLAM. Використання

фільтрів Калмана та розширені фільтри Калмана EKF (Extended Kalman Filter) дозволяє зменшити помилки позиціонування до 0,2–0,5 м і скоротити обчислювальні витрати на 40–60% порівняно з монометодними системами. Отримані результати свідчать, що гібридні підходи підвищують стійкість до дрейфу та шумів і знижують OPEX за рахунок оптимізації ресурсів, формуючи підґрунтя для подальшої економічної оцінки навігаційних технологій.

Розвиток концепції сенсорної інтеграції у контексті ройових систем простежується у праці Л. Чжана, С. Као, М. Су та Ю. Суй [2]. Автори пропонують модель колаборативної інтегрованої навігації, що поєднує розподілену ф'южн-архітектуру з алгоритмами консенсусу й машинного навчання. Емпіричні випробування з роями до 20 БпЛА засвідчують підвищення точності траєкторного планування на 50–70% і зниження енергоспоживання на 30%. Економічна частина дослідження демонструє зниження CAPEX на одиницю БпЛА та ROI 20–28%, що є релевантним для оборонних і аграрних флотів в Україні.

Поглиблений аналіз GNSS-denied методів представлено у роботі С. Чжоу та співавторів [3], які створили датасет SatLoc і запропонували ієрархічну адаптивну ф'южн-рамку для локалізації БпЛА. Результати показують точність до 0,1 м у складних умовах (туман, урбанізовані перешкоди) та підвищення обчислювальної ефективності на 35–55%. Автори підкреслюють економічні вигоди відкритих датасетів, що скорочують витрати на R&D на 25–40% і підвищують ROI до 30%, що має значення для України як ринку з обмеженими ресурсами.

Подальшу еволюцію terrain-aware підходів відображає дослідження Ф. Яо та співавтори [4]. Розроблена система terrain-weighted constraint optimization забезпечує drift-free позиціонування без IMU та з урахуванням топографії місцевості, що дає змогу зменшити OPEX на 30–50% і досягти ROI 20–25%. Для українських умов така методика є перспективною у зонах бойових дій, де GNSS-сигнал часто деградує.

Аспекти стійкості GNSS-компонентів висвітлено у технічному звіті GPSPatron [5], присвяченому вибору анти-спуфінг та анти-джемінг-технік для resilient GNSS. Застосування антенних масивів (CRPA) та AI-детекції підвищує стійкість сигналу на 60–85% при похибці < 0,5 м, знижуючи ризик втрат місій на 40–60%. Економічні вигоди оцінюються на рівні ROI 18–24%, що є вагомим аргументом для українських оборонних програм.

Дослідження Ю. Зідана, Ж. Сілви та Г. Тавреша [6] підтверджує, що комбіновані атаки GNSS-джемінгу та спуфінгу можуть призвести до втрати контролю над БпЛА, тоді як використання VO/SLAM скорочує ризики на 50–70%. Вартісна оцінка демонструє, що resilient-дизайн підвищує ROI до 30% завдяки зниженню втрат місій –

висновок, релевантний для формування стратегії стійкості українського сектору.

Економічно-регуляторні виміри навігаційних систем розкрито в роботі К. Декера та П. Чіамбаретто [7], де проаналізовано політики управління UTM в ЄС та США. Автори показують, що децентралізовані моделі UTM зменшують OPEX на 25–45% і забезпечують ROI 15–25%, проте потребують гармонізації регуляторних рамок – питання, критичне для України в контексті інтеграції з EASA та ICAO.

Систематичний огляд А. Джазайрі та співавторів [8] підтверджує, що використання гібридних навігацій у last-mile delivery зменшує OPEX на 40–60% та забезпечує ROI 20–35%, при цьому CAPEX окупається протягом 18–36 місяців. Такі висновки особливо релевантні для гуманітарної логістики й аграрного експорту України. Дослідження І. Ковальова та співавторів [9] розробляє cost-effectiveness модель транспортно-технологічних циклів ройових БпЛА для агросектору, демонструючи зниження OPEX на 30–50% і ROI 18–26%. Нарешті, Е. Філіопулу та співавтори [10] доводять економічну життєздатність Drone-as-a-Service (DaaS)-моделей з окупністю 2–4 роки та ROI 22–32%, що робить їх перспективними для українського ринку логістики.

Попри інтенсивний розвиток досліджень, більшість із них концентрується переважно на технічних аспектах, тоді як питання комплексної економічної оптимізації навігаційних систем у країнах із трансформаційною економікою залишаються недостатньо вивченими. В умовах воєнних ризиків і регуляторної фрагментації для України особливо актуальним є створення інтегрованої моделі, що поєднає міжнародний досвід сенсорної ф'южн із фінансово-інвестиційним аналізом та адаптивним траєкторним плануванням, що визначає наукову нішу та практичну значущість подальших досліджень у сфері економічної оптимізації систем навігації БпЛА.

У зв'язку із зазначеним вище метою статті є економічне обґрунтування сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів як інструменту підвищення інвестиційної привабливості та стимулювання розвитку дрон-економіки України. Для досягнення цієї мети пропонується розроблення концептуальної моделі економічної оптимізації, яка інтегрує технічні параметри навігаційних систем із фінансово-аналітичним моделюванням, що забезпечує комплексне оцінювання їх ефективності. Для реалізації поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

1. Провести порівняльний економічний аналіз основних методів навігації БпЛА з урахуванням показників капітальних та операційних витрат, рентабельності інвестицій і ризиків функціонування в умовах обмеженої видимості, джемінгу та дрейфу.

2. Оцінити економічну ефективність гібридних навігаційних систем, через моделювання впливу

підвищеної точності позиціонування на ключові фінансові параметри підприємств-розробників та користувачів.

3. Розробити авторську концептуальну модель економічної оптимізації навігації БпЛА.

4. Проаналізувати практичні кейси впровадження сучасних навігаційних рішень, для емпіричної валідації ринкової ефективності, виявлення специфічних бар'єрів і визначення потенційних напрямів масштабування.

5. Ідентифікувати ключові ризики та бар'єри інвестування в український сектор БпЛА, із формуванням аналітичної бази для подальшої розробки державних і корпоративних стратегій їх мінімізації.

6. Сформулювати практичні рекомендації щодо державної політики, інвестиційних програм і стимулів для приватного сектору, спрямованих на подолання ідентифікованих бар'єрів, гармонізацію нормативного середовища з європейськими стандартами.

Сучасний ландшафт навігаційних систем безпілотних літальних апаратів формується під впливом швидкої технологічної еволюції та економічної турбулентності глобального ринку. За прогнозами аналітичних звітів, його обсяг досягне десятків мільярдів доларів до кінця 2020-х років із середньорічним темпом зростання (CAGR) 15–18% [1, 8]. Навігаційні технології відіграють визначальну роль у забезпеченні точності, стійкості та рентабельності операцій. Ключові методи – глобальна навігаційна супутникова система (GNSS), інерційна навігаційна система (INS), візуальна одометрія (VO) та одночасна локалізація й картографування (SLAM) – еволюціонують від монометодних до гібридних рішень, що інтегрують алгоритми штучного інтелекту для стабільної роботи у GNSS-denied середовищах [1, 3].

Аналіз цих технологій охоплює як технічну, так і економічну площину – капітальні витрати (CAPEX), операційні (OPEX), профілі ризику та прибутковості (ROI). Традиційні системи виявляють високу вразливість у зонах джемінгу та дрейфу, що зумовлює зростання OPEX та втрати інвестицій [5, 6]. Для України, де ринок БпЛА у 2024 р. зріс на 15–18% [14], гібридні навігаційні рішення забезпечують ROI на рівні 18–25% в аграрному та оборонному секторах попри фінансові й експортні бар'єри.

GNSS є основою глобального позиціонування (точність 1–5 м за рахунок GPS, GLONASS, Galileo) [1]. CAPEX середньої системи становить 500–2000 дол. США (антени, приймачі), OPEX – 100–300 дол. США на рік (обслуговування, RTK-корекції). Система економічно вигідна в стабільних умовах (ROI 15–20%), але вразлива до джемінгу й спуфінгу, де втрати можуть перевищувати кілька тисяч доларів за інцидент [6]. Використання low-cost GNSS-модулів (u-blox NEO-M8) знижує CAPEX до 50–150 дол. США і забезпечує точність 2–3 м у відкритих зонах, проте похибка multipath в урбанізованих умовах сягає 5–10 м [11, 12].

INS базується на акселерометрах і гіроскопах для автономного обчислення позиції з точністю 0,05–1°/год без зовнішніх сигналів [2]. Це система з високою стійкістю до джеміну та оновленням до 100 Гц, однак ризик дрейфу зумовлює накопичення помилок до кількох кілометрів за годину, підвищуючи OPEX на 40–60% через потребу в корекції [4]. ROI становить 12–18% у коротких місіях, але зменшується в довготривалих через накопичення похибок.

Візуальна одометрія (VO) здійснює оцінку руху через послідовний аналіз зображень і досягає точності 0,5–2% від дистанції [1]. CAPEX – 800–3000 дол. США (камери, процесори), OPEX – 150–400 дол. США/рік [8]. Недолік – чутливість до освітлення та текстури, що в темряві підвищує помилки до 50% [6]. ROI 16–22% у урбан-доставках, але потребує гібридизації для стабільності.

SLAM поєднує VO та картографування, досягаючи точності 0,1–0,5 м у динамічних середовищах [3]. CAPEX – 1500–6000 дол. США

(LiDAR/камери, GPU), OPEX – 300–700 дол. США/рік [3]. Ризики пов'язані з накопиченням дрейфу та сезонною деградацією (до 40%) [4]. ROI – 18–25%, але високі початкові витрати обмежують масове використання. Інтеграція LiDAR з GNSS/INS через EKF забезпечує точність 0,3–0,5 м у GNSS-challenging зонах і знижує OPEX на 20–40% [11].

Інтегровані архітектури LDF-Nav, що використовують RPCA та Transformer-модельовання, досягають точності 0,1–0,2 м за наявності до 40% аномальних даних, зменшуючи OPEX на $\approx 20\%$ [13]. Такі рішення дозволяють підвищити стійкість до перешкод на 25–30% порівняно з традиційними EKF-схемами та формують новий рівень економічної ефективності.

Для наочного порівняння технічних характеристик і витратних параметрів систем у різних сценаріях застосування (стабільні умови та GNSS-denied середовища) у табл. 1 подано узагальнені результати порівняльного аналізу.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз навігаційних методів БпЛА

Метод	Точність (м)	CAPEX (\$)	OPEX (\$/рік)	Основний ризик	ROI (стабільні умови),%	ROI (GNSS-denied),%
GNSS	1–5	500–2000	100–300	Джемінг, спуфінг	15–20	< 10
Low-cost GNSS	1–3	50–200	50–150	Multipath (5–10 м в урбані)	18–25	5–12
INS	0,05–1°/год	1000–5000	200–500	Дрейф	12–18	8–12
VO	0,5–2 % від дистанції	800–3000	150–400	Освітлення, текстура	16–22	10–15
SLAM	0,1–0,5	1500–6000	300–700	Дрейф без loop closure	18–25	15–20
LDF-Nav (RPCA + Transformer)	0,1–0,2	2000–8000	250–600	До 40% аномальних даних	20–28	17–24

Джерело: узагальнено автором на основі [1–14]

Обговорення

Як показує табл. 1, монометодні системи (GNSS чи INS) демонструють найнижчий показник ROI у нестабільних умовах через високу вразливість до зовнішніх факторів. GNSS забезпечує дешеве глобальне позиціонування (точність 1–5 м), але схильне до джеміну та спуфінгу, що призводить до втрат інвестицій та збільшення OPEX на 20–30% через необхідність резервного контролю [5, 6]. Low-cost GNSS зменшує CAPEX у 10 разів, але в урбанізованих зонах його похибка зростає до 5–10 м [12].

INS є більш стійкою до перешкод, однак накопичення дрейфу призводить до збільшення витрат на калібрування та зниження ROI до 12–18%. VO та SLAM забезпечують високу локальну точність, але залежать від умов освітлення та текстурності, а SLAM-системи вимагають високої обчислювальної потужності

(GPU/LiDAR) [3, 4]. У результаті їхній CAPEX вищий на 20–30%, що знижує інвестиційну привабливість для малих операторів.

Гібридні архітектури (на базі EKF чи AI-fusion) дозволяють досягти компромісу між вартістю та надійністю. Зокрема, інтеграція LiDAR з GNSS/INS забезпечує точність 0,3–0,5 м у GNSS-challenging зонах та знижує OPEX на 20–40% [11]. Системи LDF-Nav з використанням RPCA та Transformer-моделей підвищують стійкість до аномалій на 25–30% і зменшують енерговитрати в реальному часі [13]. Таким чином, комбінація GNSS/INS з VO або SLAM дозволяє досягти ROI 18–30% у різних галузях – від аграрного сектору до логістики та оборони.

Для українського ринку, де у 2024 р. зростання індустрії БпЛА становило 15–18% [14], саме гібридні навігаційні системи стають основою підвищення інвестиційної привабливості та

експортного потенціалу. Вони дозволяють збалансувати високий CAPEX розподілом у ройових операціях та зниженням OPEX завдяки оптимізації ресурсів і штучному інтелекту. Це створює передумови для перетворення українського дрон-сектору на повноцінний високотехнологічний кластер з ROI 18–25% у базових галузях.

Гібридні навігаційні системи БпЛА, що інтегрують глобальні навігаційні супутникові системи з інерціальними навігаційними системами, візуальною одометрією, технологіями одночасної локалізації та картографування і корекцією на основі штучного інтелекту, поступово витісняють монометодні рішення. Їхня ключова перевага – стійке позиціонування у GNSS-denied середовищах (під джеміном, спуфінгом, у міських каньйонах чи лісах) з точністю 0,1–0,5 м і зменшенням операційних витрат на 60–80% [15, 16].

Федеративна архітектура таких систем поєднує локальні розширені фільтри Калмана (EKF) з глобальним координатором, що здійснює адаптивне злиття даних від кількох сенсорів. Це забезпечує підвищення стійкості до перешкод на 30–50% та скорочення часу відновлення після збоїв до 0,1–0,3 с [17]. Еволюція від аналітичних методів фільтрації (EKF, UKF, графова оптимізація) до алгоритмів глибокого й підкріплювального навчання дозволила реалізувати динамічну адаптацію ваг вимірювань і зменшити похибки INS та GNSS у реальному часі.

Основою гібридної навігації є EKF, який описує нелінійну динаміку руху через етапи прогнозу та корекції стану. Вектор стану БпЛА

$$x_k = [p, v, q, b_a, b_g]^T, \quad (1)$$

(позиція, швидкість, орієнтація, зсув акселерометра та гіроскопа) прогнозується за INS-даними:

$$x_k^- = f(x_{k-1}, u_k), P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k, \quad (2)$$

де f – нелінійна модель руху;
 F_k – якобіан;
 Q_k – коваріаційна матриця шуму процесу.

Корекція відбувається за вимірюваннями GNSS, VO чи SLAM:

$$K_k = P_k - H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (3)$$

$$x_k = x_k^- + K_k (z_k - h(x_k^-)),$$

де H_k – матриця спостережень
 R_k – матриця шуму вимірювань [11, 15].

Методи злиття, підсилені ШІ, динамічно адаптують R_k і зменшують дрейф INS на 70–85% та ефект multipath у GNSS на 50–70%, перевищуючи класичний EKF за точністю на 15–25% [15]. Підходи на основі навчання з підкріпленням або Transformer-архітектур забезпечують адаптивне виділення ознак із мультимодальних даних (LiDAR, оптичних, WiFi), підвищуючи стійкість системи на 20–40% у складних сценаріях [16]. Федеративне злиття дозволяє ізолювати збої

окремих сенсорів, знижуючи ризик системної відмови на 40–60% і операційні витрати (OPEX) на 15–25% завдяки модульності [17].

Останні дослідження також підкреслюють потенціал інтеграції низькоорбітальних систем позиціонування, навігації й часу (LEO-PNT) із мультимодальним ф'южнгом, що зменшує залежність від середньоорбітальних GNSS на 50–70% і забезпечує субдециметрову точність у відкритих і міських зонах [18]. У результаті INS-дрейф зменшується на 70–80%, а стійкість позиціонування зростає навіть у середовищах із потужними радіоперешкодами.

З економічного погляду гібридні навігаційні рішення демонструють зниження капітальних витрат (CAPEX) на 20–30% порівняно з монометодними системами, оскільки використовують низьковартісні сенсори (GNSS-модулі 50–200 дол. США + MEMS-INS 500–1000 дол. США). Операційні витрати (OPEX) знижуються на 40–60% завдяки меншій частоті калібрувань і скороченню простоїв [10, 12]. Інтеграція LEO-PNT з resilient-ф'южнгом підвищує рентабельність інвестицій (ROI) на 7–12% у оборонному та аграрному секторах завдяки скороченню простоїв до 80% і забезпеченню навігаційної цілісності понад 99,9% [18].

Федеративне злиття даних зменшує простої критичних місій на 50–70%, що підвищує ROI на 5–7% завдяки ізоляції відмов сенсорів [17]. Перехід до моделей навчання з глибоким підкріпленням, скорочує обчислювальні витрати на 25–35%, забезпечуючи додаткове зростання ROI на 4–6% через end-to-end оптимізацію [16]. У ройових операціях, де капітальні витрати розподіляються між кількома апаратами, ROI сягає 22–28% в аграрному секторі (точне обприскування) та 18–25% в оборонному секторі (розвідка в зонах джеміну) [9, 14].

Додаткове підвищення ефективності на 3–5% забезпечують ШІ-алгоритми адаптивної оптимізації, що скорочують енергоспоживання та час обробки на 20–30% [15].

Рентабельність інвестицій (ROI) розраховується за формулою:

$$ROI = \frac{\sum(Revenue - OPEX) - CAPEX}{CAPEX} 100\%, \quad (4)$$

де Revenue зростає на 50–70% завдяки підвищенню продуктивності (менше втрат врожаю чи місій), а OPEX зменшується на 60–80% через оптимізацію ресурсів і скорочення простоїв [9].

В українському контексті гібридні системи з EKF та ШІ-корекцією демонструють ROI 20–30%, що робить їх привабливим інвестиційним активом навіть за умов валютної турбулентності та експортних обмежень [14].

Як показано в табл. 2, із підвищенням рівня інтеграції сенсорів і впровадженням ШІ-корекції відбувається експоненційне зростання точності при помірному зростанні капітальних витрат.

Економіко-технічний аналіз гібридних навігаційних систем

Конфігурація	Точність (м)	CAPEX (\$/од.)	OPEX (\$/рік)	Зниження втрат (%)	ROI (%)
GNSS/INS	0,5–1,0	1500–3000	200–400	40–60	15–20
GNSS/INS + VO	0,3–0,7	2000–4000	250–500	50–70	18–23
GNSS/INS + SLAM (EKF)	0,1–0,5	2500–6000	300–600	60–80	20–25
GNSS/INS + AI Fusion	0,05–0,3	2800–7000	220–550	70–90	23–30
Multi-Sensor Learning Fusion	0,05–0,2	3000–8500	200–500	80–95	25–32
Hybrid Federated Fusion	0,08–0,4	3200–9000	180–480	85–98	27–35
LEO-PNT + Multi-Sensor Fusion	0,03–0,2	4000–12000	120–400	90–97	30–35
LDF-Nav (RPCA + Transformer)	< 0,1	3000–8000	250–550	70–85	22–28

Джерело: складено автором на основі мета аналізу джерел [1, 3, 9–18].

Перехід від GNSS/INS до AI-fusion або Multi-Sensor Learning Fusion зменшує втрати місій у 1,5–2 рази та збільшує ROI з 15–20% до 25–32%. LEO-PNT-сценарії, що передбачають використання низькоорбітальних супутників і мультимодального ф'южну, демонструють найвищу рентабельність (до 35%), поєднуючи технічну надійність і економічну ефективність.

Гібридні навігаційні системи з EKF та III-корекцією трансформують навігацію БПЛА з технічного інструменту в високорентабельний інвестиційний актив, який забезпечує стабільність і стійкість капіталовкладень навіть у волатильних умовах українського ринку.

Концептуальна модель економічної оптимізації навігаційних систем БПЛА базується на інтеграції технічних і фінансових параметрів у єдину систему оцінювання ефективності. Вона структурована навколо чотирьох взаємопов'язаних модулів:

Сенсорна інтеграція – об'єднання даних GNSS, INS, VO та SLAM із використанням розширеного фільтра Калмана (EKF) і алгоритмів штучного інтелекту для підвищення точності позиціонування до 0,1–0,5 м.

Фінансове моделювання – розрахунок NPV, IRR та ROI з урахуванням CAPEX/OPEX і впливу технологічних параметрів на прибутковість.

Адаптивне траєкторне планування – застосування алгоритмів динамічної оптимізації маршрутів для зниження простоїв на 50–70% унаслідок ризиків джемінгу або інерційного дрейфу.

Регуляторні фактори – врахування вимог ICAO, EASA та національних стандартів для мінімізації правових бар'єрів впровадження.

Математичне ядро моделі представлено скоригованим показником чистої теперішньої вартості:

$$NPVadj = \sum_{t=1}^n \frac{(CF_t \times \eta_{tech})}{(1+r)^t} - CAPEX, \quad (5)$$

де η_{tech} – коефіцієнт технічної ефективності, що відображає підвищення точності навігації, рівень відмовостійкості (зменшення ризиків на 40–60%) [19] і скорочення

операційних витрат на 35–50% [20].

Завдяки такій структурі модель дозволяє порівнювати інвестиційні проекти не лише за фінансовими показниками (ROI 15–30%), а й за технологічною надійністю, що забезпечує комплексну оцінку ефективності в умовах високої волатильності, коли класичні фінансові моделі не враховують вплив сенсорних інновацій на довгострокову стійкість [21].

Практична перевірка здійснюється на основі емпіричних даних. Для DJI Mavic 3 Enterprise, що використовує гібридну навігацію GNSS/INS з візуальною (VO) та SLAM-корекцією, зафіксовано $ROI \approx 22\%$ при економії 25% робочого часу та точності 0,2–0,5 м у GNSS-denied зонах; термін окупності CAPEX становить близько 1,5 року [13, 22]. В українських умовах, за даними KSE Bravel (2024 р.), аграрні дрони демонструють ROI 24–27% завдяки оптимізації процесів обприскування та зниженню OPEX на 40% [23, 24]; оборонні моделі – 18–22%, із підвищеною стійкістю до джемінгу; сумарний внесок галузі у ВВП оцінюється в 0,4–0,6%. Зазначені результати підтверджують ефективність моделі $NPVadj$: підвищення η_{tech} додає 5–10% до розрахункової прибутковості, а використання гібридних рішень забезпечує ROI у діапазоні 18–30% [24–27].

Незважаючи на динаміку зростання, сектор БПЛА в Україні залишається вразливим до низки ризиків, згрупованих за чотирма категоріями (табл. 3).

Подальший розвиток дрон-економіки України базується на концепції трансформації галузі у високотехнологічний кластер з орієнтацією на експорт та інновації [21, 23, 26]. Рекомендовано три вектори державної та приватної політики:

Інституційний напрям – створення DroneTech Investment Fund (спільна ініціатива Bravel та Мінцифри) для підтримки проєктів з $ROI > 20\%$ та залучення інвестицій обсягом до 500 млн. дол. США [14, 24].

Технологічний напрям – запуск національної програми Anti-Jamming AI Navigation з бюджетом 100–200 млн. дол. США для розвитку гібридних навігаційних систем із $\eta_{tech} > 0,85$, включно з

Ключові ризики інвестування в сектор БПЛА та їх вплив на RO

Код ризику	Опис	Потенційний ефект на ROI
R1 (Технологічний)	Джемінг/спуфінг GNSS, відсутність LEO-PNT інфраструктури [19, 25]	Зниження на 10–15% через втрати місій
R2 (Фінансовий)	Високий CAPEX (\$1500–6000) та нестача довгострокового фінансування [20]	Зниження на 8–12% через затримки впровадження
R3 (Регуляторний)	Розрив стандартів FAA/EASA та ДАСУ, затримка сертифікації на 6–12 місяців [21, 23, 26]	Зниження на 5–10% через витрати на адаптацію
R4 (Кадровий)	Відтік фахівців (15–20% щорічно) та нестача інжинірингових центрів [14, 27]	Зниження на 7–10% через уповільнення інновацій

Джерело: складено автором на основі [5, 6, 14, 19–27]

LEO-PNT та земними C-PNT технологіями на зразок NextNav TerraPoiNT, що забезпечують стійкість у GNSS-denied середовищах [19, 20, 25].

Регуляторний напрям – гармонізація національних правил з вимогами EASA та впровадження sandbox-моделі тестування для прискорення сертифікації на $\approx 40\%$, з урахуванням U-space та вимог кібербезпеки для операцій БПЛА [20, 23, 26].

За умови реалізації зазначених заходів очікується зростання ринку на 25–30% CAGR до 2030 р., збільшення внеску галузі у ВВП до 5–8 млрд USD та збереження середнього ROI на рівні 20–30% [19–27].

Висновки

Проведене дослідження підтвердило, що гібридизація навігаційних систем БПЛА – поєднання GNSS, INS, VO, SLAM та алгоритмів штучного інтелекту – має не лише технічну, а й виражену економічну доцільність. Розроблена концептуальна модель економічної оптимізації NPVadj доводить, що врахування технічного коефіцієнта ефективності η_{tech} у фінансових розрахунках дозволяє адекватно оцінювати реальну прибутковість інвестицій у високотехнологічні системи навігації. Емпіричні дані підтверджують, що гібридні рішення забезпечують ROI 18–30%, знижують операційні витрати на 40–60% та підвищують точність позиціонування до субдециметрового рівня, що формує передумови для розвитку економіки дронів як самостійного сектору.

Для України дрон-економіка перетворюється на стратегічний напрямок цифрової індустріалізації, який поєднує оборонні, аграрні та IT-компоненти. Запропоновані інституційні (створення DroneTech Investment Fund), технологічні (програма Anti-Jamming AI Navigation) та регуляторні (гармонізація з EASA та впровадження sandbox-моделей) заходи створюють системну рамку для масштабування ринку. Реалізація цих ініціатив здатна забезпечити зростання галузі і підвищити внесок сектору у ВВП.

Отже, дрон-економіка постає як одна з найдинамічніших сфер національної інноваційної екосистеми, де інтеграція сенсорних технологій та фінансового моделювання стає ключем до підвищення конкурентоспроможності України у глобальному технологічному просторі.

Список використаних джерел

- Jarraya I., Al-Batati A., Kadri M. B. та ін. GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satell Navig.* 2025. Vol. 6, no. 9. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.
- Zhang L., Cao X., Su M., Sui Y. Collaborative Integrated Navigation for Unmanned Aerial Vehicle Swarms Under Multiple Uncertainties. *Sensors.* 2025. Vol. 25, no. 3. P. 617. DOI: 10.3390/s25030617.
- Zhou X., Zhang X., Yang X., Zhao J., Liu Z., Shuang F. Towards UAV Localization in GNSS-Denied Environments: The SatLoc Dataset and a Hierarchical Adaptive Fusion Framework. *Remote Sensing.* 2025. Vol. 17, no. 17. P. 3048. DOI: 10.3390/rs17173048.
- Yao F., Lan C., Wang L., Wan H., Gao T., Wei Z. GNSS-denied geolocalization of UAVs using terrain-weighted constraint optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2024. Vol. 135. P. 104277. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104277.
- GPSPatron. Selecting Optimal Anti-Spoofing and Anti-Jamming Techniques for Resilient GNSS. GPSPatron Technical Report. 2024. URL: <https://gpspatron.com/wp-content/uploads/2024/05/Selecting-Optimal-Anti-Spoofing-and-Anti-Jamming-Techniques-for-Resilient-GNSS.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
- Zidane Y., Silva J., Tavares G. Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study. *Drones.* 2024. Vol. 8, no. 12. P. 743. DOI: 10.3390/drones8120743.
- Decker C., Chiambaretto P. Economic policy choices and trade-offs for Unmanned aircraft systems Traffic Management (UTM): Insights from Europe and the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2022. Vol. 157. P. 40–58. DOI: 10.1016/j.tra.2022.01.006.
- Jazairy A., Persson E., Brho M., von Haartman R., Hilletoft P. Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management.* 2025. Vol. 36, no. 7. P. 1–62. DOI: 10.1108/IJLM-04-2023-0149.
- Kovalev I., Kovalev D., Astanakov K., Podoplelova V., Voroshilova A., Shaporova Z. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs. *E3S Web of Conferences.* 2024. Vol. 471. P. 04017. DOI: 10.1051/e3sconf/202447104017.
- Filiopoulou E., Bardaki C., Nikolaidou M., Michalakelis C. Drone-as-a-Service for last-mile delivery: Evidence of economic viability. *Economics of Transportation.* 2025. Vol. 41. P. 100398. DOI: 10.1016/j.ecotra.2025.100398.
- Elamin A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors.* 2022. Vol. 22, no. 24. P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
- Hamza V., Stopar B., Sterle O. та ін. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a

- review. GPS Solutions. 2024. Vol. 28, no. 149. DOI: 10.1007/s10291-024-01686-8.
13. Wang A., Guo Y., Chen H. Sensor data fusion optimization in UAV integrated navigation based on matrix factorization. *Array*. 2025. Vol. 28. P. 100524. DOI: 10.1016/j.array.2025.100524.
14. Bilousova O., Omelchenko E., Makarchuk M., Mylovanov T. Ukraine's Drones Industry: Investments and Product Innovations. KSE Institute & Brave1. 2024. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Brave1-report-v.1.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
15. Tarek M., Zahran S., Oda E., Nafea S. Integrated INS/GNSS Navigation Systems: A Comprehensive Review of Filtering and AI-Based Fusion Techniques. *Suez Canal Engineering, Energy and Environmental Science*. 2025. Vol. 3. P. 17–30. DOI: 10.21608/sceee.2025.378670.1076.
16. Zhuang Y., Sun X., Li Y. та ін. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*. 2023. Vol. 95. P. 62–90. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.
17. Negru S. A., Geragersian P., Petrunin I., Guo W. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 3. P. 981. DOI: 10.3390/s24030981.
18. NAVigation innovation support programme Advisory Committee (NAVAC). PNT Vision 2035 White Paper. European Space Agency. 2024. URL: <https://navisp.esa.int/uploads/files/documents/NAVAC%20White%20Paper%20May%202024.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
19. National Telecommunications and Information Administration (NTIA). Inventory of Complementary, Alternative, and Augmentative PNT Solutions. U.S. Department of Commerce. 2025. URL: <https://www.ntia.gov/sites/default/files/2025-05/inventory-of-pnt-solutions.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
20. U.S. Department of Transportation (DOT). Complementary Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Action Plan. 2023. URL: https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2023-09/DOT%20Complementary%20PNT%20Action%20Plan_Final.pdf (дата звернення: 03.11.2025).
21. Nafar N., Fatemi M., Rezaei-Moghaddam K. Smart drone in sustainable agriculture: Evaluating four predictive models for technology adoption in Iran. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2025. DOI: 10.1016/j.iaia.2025.100594.
22. My Surveying Direct. ROI with DJI Enterprise. 2025. URL: https://www.mysurveyingdirect.com/blogs/surveying/roi-with-dji-enterprise?srltid=AfmBOooJgB6pxju5c26El9EQwo_1aH5KNorpM9UTi6NbWn3egvKdyECx (дата звернення: 03.11.2025).
23. Panigati T., Zini M., Striccoli D. та ін. Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 173. P. 106101. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106101.
24. European Economic and Social Committee (EESC). Opinion on 'Drone strategy 2.0' (Own-initiative opinion) (C/2023/858). Official Journal of the European Union, C series. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023IE1646> (дата звернення: 03.11.2025).
25. DroneUA. Участь DroneUA в UCAB Agrotechnology 2024. 2024. URL: <https://drone.ua/blogs/news/droneua-participation-in-ucab-agrotechnology-2024> (дата звернення: 03.11.2025).
26. Bonenberg L., Motella B., Paonni M., Fortuny Guasch J. An Assessment of the Future EU Complementary Position Navigation Time (C-PNT) Ecosystem. JRC Technical Report, EUR 31899 EN, Joint Research Centre, European Commission, Luxembourg. 2024. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/681671> (дата звернення: 03.11.2025).
27. Lendon B. Ukraine's drone defense tech industry is booming amid warfare with Russia. *Business Insider*. 2025. URL: <https://www.businessinsider.com/ukraine-drone-defense-tech-industry-warfare-russia-attacks-2025-4> (дата звернення: 03.11.2025).

Volodymyr Malovanyi (candidate of technical sciences)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Volodymyr Zhurid

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Mykola Kapinos (candidate of sciences in public administration)

<https://orcid.org/0000-0003-3932-1381>

Ruslan Yakovliev

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

MODERN METHODS OF NAVIGATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

The article is dedicated to a comprehensive study of modern navigation methods for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), focusing on their economic efficiency and investment attractiveness, particularly in the context of the Ukrainian drone economy. In the face of global technological volatility, increased risks of GNSS jamming and spoofing, and the rapid growth of the UAV market, traditional navigation systems (GNSS, INS) reveal significant shortcomings, leading to a decrease in Return on Investment (ROI) below 10% in conflict zones. In the

face of global technological volatility, increased risks of GNSS jamming and spoofing, and the rapid growth of the UAV market, traditional navigation systems (GNSS, INS) reveal significant shortcomings, leading to a decrease in Return on Investment (ROI) below 10% in conflict zones. In this context, hybrid navigation systems that integrate GNSS, INS, Visual Odometry (VO), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technologies, and Artificial Intelligence (AI) algorithms emerge as a key tool for overcoming these limitations. The aim of the work is to provide an economic rationale for modern UAV navigation methods as a tool for enhancing investment attractiveness and stimulating the development of Ukraine's drone economy. To achieve this goal, an original conceptual model of economic optimization is proposed, integrating the technical parameters of navigation systems (positioning accuracy, interference resilience) with financial-analytical modeling (NPV, IRR, ROI, CAPEX, OPEX). The model comprises four interconnected modules: sensor integration, financial modeling, adaptive trajectory planning, and consideration of regulatory factors. Its mathematical core is based on an adjusted Net Present Value indicator (NPV_{adj}), which incorporates a technical efficiency coefficient (η_{tech}). The article provides a comparative analysis of the main navigation methods (GNSS, INS, VO, SLAM, hybrid systems), determines their techno-economic characteristics (accuracy, CAPEX, OPEX, ROI), and assesses their impact on financial performance. Key risks for the Ukrainian UAV sector (technological, financial, regulatory, personnel) are identified, and a set of practical recommendations for public policy is proposed, aimed at creating an investment fund, developing anti-jamming AI navigation technologies, and harmonizing the regulatory framework with European standards. The conclusions confirm that the hybridization of navigation systems transforms them from a technical tool into a highly profitable investment asset capable of ensuring the sustainable development of the national drone economy.

Key words: Unmanned Aerial Vehicles, navigation systems, hybrid navigation, visual odometry, artificial intelligence, economic efficiency, Return on Investment.

Список використаних джерел

1. Jarraya I., Al-Batati A., Kadri M. B. та ін. GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satell Navig.* 2025. Vol. 6, no. 9. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.
2. Zhang L., Cao X., Su M., Sui Y. Collaborative Integrated Navigation for Unmanned Aerial Vehicle Swarms Under Multiple Uncertainties. *Sensors.* 2025. Vol. 25, no. 3. P. 617. DOI: 10.3390/s25030617.
3. Zhou X., Zhang X., Yang X., Zhao J., Liu Z., Shuang F. Towards UAV Localization in GNSS-Denied Environments: The SatLoc Dataset and a Hierarchical Adaptive Fusion Framework. *Remote Sensing.* 2025. Vol. 17, no. 17. P. 3048. DOI: 10.3390/rs17173048.
4. Yao F., Lan C., Wang L., Wan H., Gao T., Wei Z. GNSS-denied geolocalization of UAVs using terrain-weighted constraint optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2024. Vol. 135. P. 104277. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104277.
5. GPSPatron. Selecting Optimal Anti-Spoofing and Anti-Jamming Techniques for Resilient GNSS. GPSPatron Technical Report. 2024. URL: <https://gpspatron.com/wp-content/uploads/2024/05/Selecting-Optimal-Anti-Spoofing-and-Anti-Jamming-Techniques-for-Resilient-GNSS.pdf> (date of application: 03.11.2025).
6. Zidane Y., Silva J., Tavares G. Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study. *Drones.* 2024. Vol. 8, no. 12. P. 743. DOI: 10.3390/drones8120743.
7. Decker C., Chiambaretto P. Economic policy choices and trade-offs for Unmanned aircraft systems Traffic Management (UTM): Insights from Europe and the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2022. Vol. 157. P. 40–58. DOI: 10.1016/j.tra.2022.01.006.
8. Jazairy A., Persson E., Brho M., von Haartman R., Hilletoft P. Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management.* 2025. Vol. 36, no. 7. P. 1–62. DOI: 10.1108/IJLM-04-2023-0149.
9. Kovalev I., Kovalev D., Astanakulov K., Podoplelova V., Voroshilova A., Shaporova Z. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs. *E3S Web of Conferences.* 2024. Vol. 471. P. 04017. DOI: 10.1051/e3sconf/202447104017.
10. Filiopoulou E., Bardaki C., Nikolaidou M., Michalakelis C. Drone-as-a-Service for last-mile delivery: Evidence of economic viability. *Economics of Transportation.* 2025. Vol. 41. P. 100398. DOI: 10.1016/j.ecotra.2025.100398.
11. Elamin A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors.* 2022. Vol. 22, no. 24. P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
12. Hamza V., Stopar B., Sterle O. та ін. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions.* 2024. Vol. 28, no. 149. DOI: 10.1007/s10291-024-01686-8.
13. Wang A., Guo Y., Chen H. Sensor data fusion optimization in UAV integrated navigation based on matrix factorization. *Array.* 2025. Vol. 28. P. 100524. DOI: 10.1016/j.array.2025.100524.
14. Bilousova O., Omelchenko E., Makarchuk M., Mylovanov T. Ukraine's Drones Industry: Investments and Product Innovations. KSE Institute & Brave1. 2024. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Brave1-report-v.1.pdf> (date of application: 03.11.2025).
15. Tarek M., Zahran S., Oda E., Nafea S. Integrated INS/GNSS Navigation Systems: A Comprehensive Review of Filtering and AI-Based Fusion Techniques. *Suez Canal Engineering, Energy and Environmental Science.* 2025. Vol. 3. P. 17–30. DOI: 10.21608/sceee.2025.378670.1076.
16. Zhuang Y., Sun X., Li Y. та ін. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion.* 2023. Vol. 95. P. 62–90. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.
17. Negru S. A., Geragersian P., Petrunin I., Guo W. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture. *Sensors.* 2024. Vol. 24, no. 3. P. 981. DOI: 10.3390/s24030981.
18. NAVigation innovation support programme Advisory Committee (NAVAC). PNT Vision 2035 White Paper. European Space Agency. 2024. URL: <https://navisp.esa.int/uploads/files/documents/NAVAC%20White%20Paper%20May%202024.pdf> (date of application: 03.11.2025).

19. National Telecommunications and Information Administration (NTIA). Inventory of Complementary, Alternative, and Augmentative PNT Solutions. U.S. Department of Commerce. 2025. URL: <https://www.ntia.gov/sites/default/files/2025-05/inventory-of-pnt-solutions.pdf> (date of application: 03.11.2025).
20. U.S. Department of Transportation (DOT). Complementary Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Action Plan. 2023. URL: https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2023-09/DOT%20Complementary%20PNT%20Action%20Plan_Final.pdf (date of application: 03.11.2025).
21. Nafar N., Fatemi M., Rezaei-Moghaddam K. Smart drone in sustainable agriculture: Evaluating four predictive models for technology adoption in Iran. Artificial Intelligence in Agriculture. 2025. DOI: 10.1016/j.iaia.2025.100594.
22. My Surveying Direct. ROI with DJI Enterprise. 2025. URL: https://www.mysurveyingdirect.com/blogs/surveying/roi-with-dji-enterprise?srsId=AfmBOooJgB6pxju5c26El9EQwo_1aH5KNorpM9UTi6NbwnN3egvKdyECx (date of application: 03.11.2025).
23. Panigati T., Zini M., Striccoli D. та ін. Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. Automation in Construction. 2025. Vol. 173. P. 106101. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106101.
24. European Economic and Social Committee (EESC). Opinion on 'Drone strategy 2.0' (Own-initiative opinion) (C/2023/858). Official Journal of the European Union, C series. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023IE1646> (date of application: 03.11.2025).
25. DroneUA. Участь DroneUA в UCAB Agrotechnology 2024. 2024. URL: <https://drone.ua/blogs/news/droneua-participation-in-ucab-agrotechnology-2024> (date of application: 03.11.2025).
26. Bonenberg L., Motella B., Paonni M., Fortuny Guasch J. An Assessment of the Future EU Complementary Position Navigation Time (C-PNT) Ecosystem. JRC Technical Report, EUR 31899 EN, Joint Research Centre, European Commission, Luxembourg. 2024. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/681671> (date of application: 03.11.2025).
27. Lendon B. Ukraine's drone defense tech industry is booming amid warfare with Russia. Business Insider. 2025. URL: <https://www.businessinsider.com/ukraine-drone-defense-tech-industry-warfare-russia-attacks-2025-4> (date of application: 03.11.2025).

Тягній Володимир Григорович (кандидат технічних наук, старший науковий співробітник)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Журід Володимир Іванович

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Васін Ігор Іванович

<https://orcid.org/0000-0003-3932-1381>

Яковлєв Руслан Петрович

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

ПЛАНУВАННЯ ТА ВИКОНАННЯ ПОЛЬОТІВ БПЛА В УМОВАХ ЗМІННОГО ОПЕРАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

Проведено комплексний аналіз сучасних наукових підходів до організації процесів планування та виконання польотів безпілотних літальних апаратів в умовах змінного операційного середовища. Особливу увагу приділено проблемі формалізації параметрів середовища, що зазнає постійних змін, зокрема метеорологічних, топографічних, радіоелектронних та інформаційно-комунікаційних факторів, які визначають рівень ризику, точність навігації та стабільність функціонування сенсорних і виконавчих підсистем. Запропоновано класифікацію змінних операційних умов за ступенем їх впливу на траєкторні характеристики польоту, що дозволяє формувати адаптивні моделі прийняття рішень. Сформульовано вимоги до побудови математичних моделей оцінки стану середовища у вигляді векторів стану, часових рядів і ймовірнісних описів, що дає змогу враховувати невизначеність під час виконання місій різного типу. Проаналізовано сучасні методи оптимізації маршрутів, які поєднують детерміновані алгоритми планування траєкторій з елементами стохастичної оптимізації. Обґрунтовано доцільність використання багатокритеріальних підходів, що забезпечують баланс між енергетичною ефективністю, часом виконання, безпекою польоту та якістю зібраної інформації. Розроблено узагальнену концепцію циклу адаптивного управління, що включає етапи попереднього планування, моніторингу середовища, корекції маршруту та оцінювання результатів виконання завдання. Показано, що застосування механізмів репланування на основі тригерних подій дозволяє своєчасно реагувати на зміни зовнішніх умов, мінімізуючи ризики втрати стійкості та відхилення від траєкторії. Розглянуто архітектурні рішення для реалізації системи управління польотом безпілотних апаратів, яка включає модулі прогнозування, оцінки обстановки, локальної оптимізації траєкторій та інтерфейсу взаємодії оператора з автоматизованою системою. Визначено принципи інтеграції інформаційних потоків, що надходять із сенсорних каналів, комунікаційних систем і блоків навігації, для забезпечення узгодженого функціонування програмних компонентів. Описано підходи до валідації та експериментальної перевірки ефективності запропонованих алгоритмів. Запропоновано систему метрик для кількісного оцінювання ефективності управління польотом, що включає показники точності позиціонування, швидкодії реагування, енергоспоживання, стабільності навігаційних рішень і рівня ризику виконання завдання. Показано, що впровадження адаптивних алгоритмів планування та управління підвищує надійність і стійкість систем безпілотних літальних апаратів у складних і динамічних умовах, сприяє зниженню впливу невизначеності середовища та забезпечує ефективне виконання польотних завдань у режимі реального часу.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, планування польоту, змінне операційне середовище, адаптивне управління, багатокритеріальна оптимізація, система підтримки прийняття рішень.

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) визначає новий рівень автоматизації процесів спостереження, моніторингу, логістики та забезпечення надійної експлуатації аероплатформи [1-3], що суттєво розширює можливості їх застосування у військовій, цивільній та науково-технічній сферах. Ефективність виконання польотних завдань безпілотними системами значною мірою залежить від здатності адаптуватися до змін операційного середовища, у

якому постійно варіюються метеорологічні, радіоелектронні, інформаційні та топографічні умови [4-6]. В умовах підвищення складності сценаріїв використання, необхідності оперативного реагування та обмеженості обчислювальних і енергетичних ресурсів особливої важливості набувають питання планування траєкторій, оптимізації управління та підвищення надійності функціонування автономних систем [5, 7-9]. Саме тому дослідження проблеми планування та виконання польотів БПЛА у змінному операційному

середовищі є надзвичайно актуальним з наукового та практичного погляду.

Матеріали та методи

У сфері планування та виконання польотів БпЛА свідчить про зростаючу увагу до проблем адаптації систем управління до динамічних умов середовища та невизначеності зовнішніх впливів [1-9]. У працях останніх років простежується тенденція до розроблення інтелектуальних моделей прийняття рішень, що базуються на стохастичних процесах, методах машинного навчання та алгоритмах оптимізації маршрутів у режимі реального часу [4-6, 10-12]. Значна частина досліджень присвячена питанням підвищення точності навігації, стійкості каналів зв'язку, енергоефективності руху та підвищенню автономності систем за рахунок удосконалення сенсорних і виконавчих модулів [6, 13-15]. Особливу увагу приділено побудові архітектур багаторівневих систем управління польотом, у яких поєднуються функції прогнозування, моніторингу стану середовища, локальної оптимізації та прийняття рішень в умовах часткової інформаційної невизначеності [9, 16-18]. У той же час більшість досліджень зосереджена на окремих технічних аспектах, як то оптимізація траєкторій, уникнення перешкод та стабілізація польоту, без належного урахування комплексної взаємодії між рівнями планування, сенсорної обробки та прийняття рішень. Невирішеною частиною дослідження залишається розроблення інтегрованої методології планування польотів БпЛА, здатної забезпечити адаптивну оптимізацію місії у змінному операційному середовищі з урахуванням ресурсних, часових і інформаційних обмежень апаратно-програмної платформи.

Отже, метою дослідження є розроблення інтегрованої методології планування та виконання польотів БпЛА у змінному операційному середовищі, яка забезпечує адаптивну оптимізацію маршрутів і параметрів місії з урахуванням ресурсних, часових та інформаційних обмежень, а також підвищення стійкості систем управління до динамічних зовнішніх впливів і невизначеності середовища.

Результати

1. Постановка завдання автоматизації процедур планування та виконання польотів БпЛА

На початковому етапі дослідження мають бути визначені основні закономірності функціонування БпЛА у змінному операційному середовищі, де взаємодія технічних, природних та інформаційних факторів формує умови прийняття рішень і виконання місії. Актуальність цього напряму зумовлена необхідністю врахування динаміки зовнішніх впливів, що безпосередньо визначають траєкторію руху, точність навігації, стабільність каналів зв'язку та ефективність управління наявним ресурсом апаратно-програмної платформи під час польоту. Для забезпечення адекватного реагування системи управління на мінливі умови передбачається виконання послідовності аналітичних і моделювальних процедур, які

формують основу адаптивного планування [6, 10, 17], як то:

систематизація типів змін у середовищі та визначення їхніх основних характеристик, що впливають на поведінку БпЛА;

формалізація параметрів операційного простору з урахуванням часової мінливості та ймовірнісної природи зовнішніх факторів;

встановлення операційних вимог до виконання місії і критеріїв оцінки їх ефективності за комплексом технічних, часових і безпекових показників;

розроблення методів кількісного оцінювання ризиків і невизначеностей, пов'язаних із виконанням польотних завдань.

Сукупність зазначених складових створює методологічну основу для побудови моделей адаптивного управління польотами в умовах змінного середовища та підвищення загальної стійкості безпілотних систем до зовнішніх впливів. У межах дослідження побудовано узагальнену методологічну структуру (рис. 1), що відображає послідовність етапів адаптивного управління польотом БпЛА. Така схема забезпечує системний підхід до визначення взаємозв'язків між динамічними факторами середовища, цільовими показниками місії та функціями оцінювання результативності польоту.

Функціонування БпЛА у реальних умовах визначається сукупністю змінних зовнішніх факторів [4-6], які формують операційне середовище польоту. Ключова особливість полягає у стохастичному характері параметрів, що змінюються у просторі та часі, а також у багаторівневій взаємодії природних, технічних та інформаційних процесів. Відповідно до цього, моделювання поведінки БпЛА потребує побудови класифікації середовищних змін із подальшою формалізацією параметрів у межах єдиного аналітичного простору.

Узагальнення та формалізація основних типів змін операційного середовища надає можливість сформувати наступну класифікацію [4-6, 13]:

1. Метеорологічні зміни, які охоплюють варіації температури, вологості, тиску, сили та напрямку вітру, рівня освітленості й оптичної прозорості атмосфери. Ці параметри безпосередньо впливають на аеродинамічні характеристики апарата, точність стабілізації та якість даних, отриманих оптичними системами.

2. Динаміка цілей і об'єктів, що відображає непередбачувані зміни просторового положення, швидкості або поведінкових характеристик цілей спостереження, транспортних засобів чи потенційних загроз. Цей тип змін визначає необхідність адаптивного коригування траєкторії та оперативного перепланування маршруту.

3. Радіоелектронні перешкоди, пов'язані з роботою засобів зв'язку, навігації та передачі даних, що проявляються у вигляді шумів, заглушень, втрати пакету сигналів або спотворенні фазових характеристик. Їхній вплив обумовлює

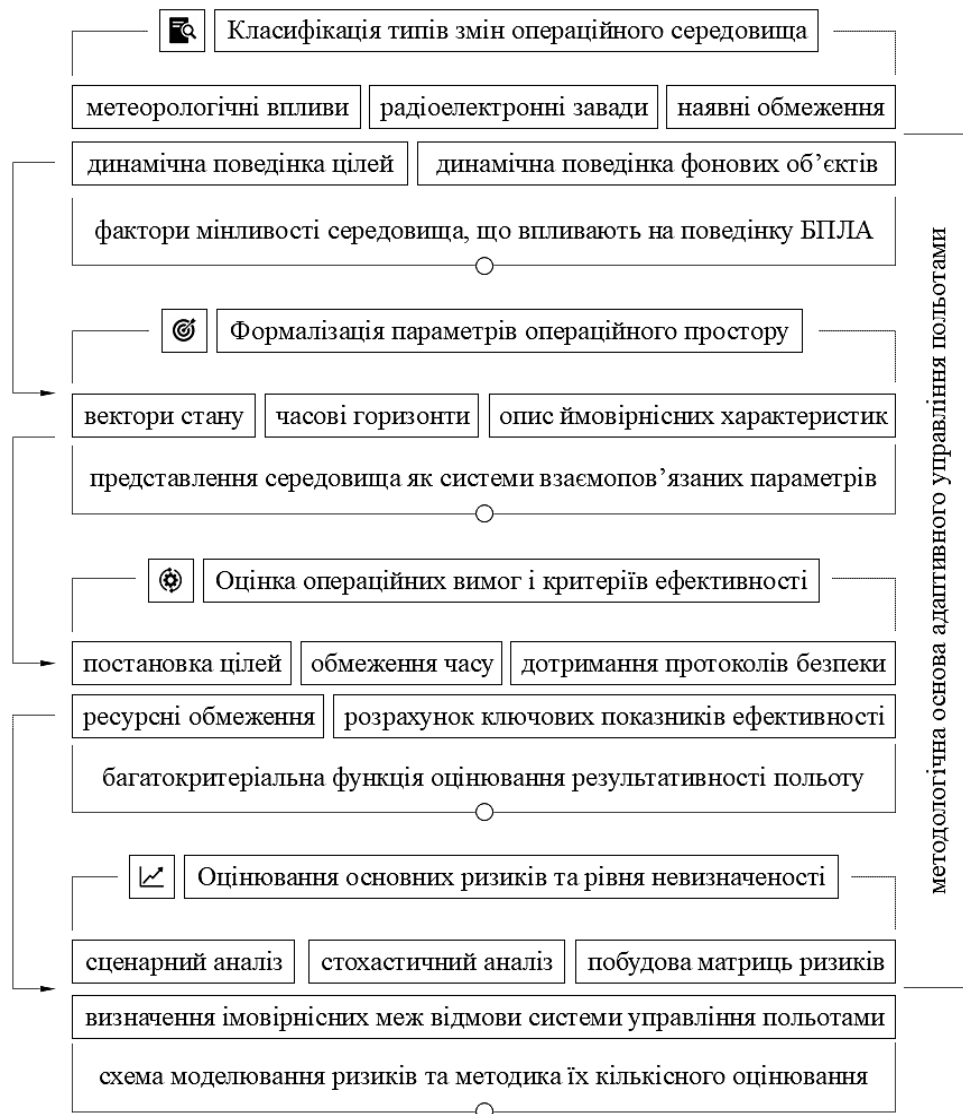


Рисунок 1 – Методологічна структура аналізу операційного середовища та ризиків адаптивного управління польотом БПЛА

потребу у використанні методів стійкої фільтрації, дублювання каналів і відновлення сигналу.

4. Обмеження повітряного простору, які включають геопросторові заборони, обмеження висоти, наявність зон заборони польотів або тимчасових коридорів, що вимагає врахування правових і регламентних аспектів під час формування траєкторії.

5. Логістичні обмеження, що стосуються доступності точок старту й посадки, зон заряджання або технічного обслуговування, запасу енергії, маси корисного навантаження й допустимого часу перебування в повітрі. Ці фактори визначають допустимі межі операційної гнучкості місії.

Для забезпечення можливості кількісного аналізу у рамках проведення дослідження було запропоновано формалізацію параметрів середовища у вигляді векторного опису стану системи

$$S(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)\},$$

де $x_n(t)$ – змінна, що описує один із параметрів середовища у момент часу t ;

$n \in [1; N]$ – кількість параметрів, що підлягають моніторингу.

Для кожного з них визначається часовий горизонт спостереження $T_n = [t_{\text{start}}^{(n)}, t_{\text{final}}^{(n)}]$, який характеризує інтервал актуальності значення параметра та функція невизначеності $U_n(t)$, що описує ступінь варіативності параметра в умовах стохастичних впливів. Ймовірнісна модель змін середовища може бути подана у вигляді функції розподілу щільності станів $P(S, t) = P(x_1, x_2, \dots, x_N, t)$, де $P(S, t)$ характеризує імовірність появи певної конфігурації середовищних параметрів у заданий момент часу. Такий підхід забезпечує можливість побудови сценаріїв прогнозування поведінки системи, виявлення критичних комбінацій факторів і формування адаптивних стратегій реагування.

Розроблення ефективних стратегій планування

польотів БпЛА потребує чіткого визначення операційних вимог до місій, у межах яких задаються цілі, обмеження, критерії оцінювання та пріоритети їх досягнення. В умовах змінного операційного середовища система управління має не лише забезпечувати досягнення поставлених завдань, а й підтримувати стабільність функціонування при варіаціях зовнішніх факторів і внутрішніх параметрів. Таким чином, процес формування вимог і показників ефективності виступає проміжною ланкою між аналітичною моделлю середовища та алгоритмічним ядром системи адаптивного планування. Основними цілями польотних місій є забезпечення виконання завдань, пов'язаних із патрулюванням територій, веденням розвідки, спостереженням за об'єктами, доставкою вантажів або виконанням рятувальних операцій [1, 5-9]. Кожен із цих типів місій характеризується власним набором операційних параметрів, які визначають траєкторію руху, тривалість польоту, необхідну точність позиціонування та вимоги до стабільності каналів зв'язку. Для формалізації планування доцільно подати місію у вигляді цільової функції $J = f(G, C, R)$, де G відображає множину цілей, C – набір обмежень, R – систему критеріїв оцінювання результатів. Операційні обмеження визначають допустимі межі зміни параметрів системи і включають енергетичні, часові, просторові та безпекові фактори. Обмеження формують множину допустимих станів системи, яку можна виразити як $\Omega = \{S \in \mathbb{R}^N: g_n(S) \leq 0, n = 1, 2, \dots, N'\}$, де $g_n(S)$ – функції, що описують відповідні фізичні чи технічні обмеження. Для забезпечення об'єктивного оцінювання результатів місії визначається набір показників ефективності (KPI), які охоплюють технічні, часові та якісні характеристики виконання завдань. До найпоширеніших метрик, що пропонується включити у систему оцінки [9-12], належать:

коефіцієнт успішності місії K_{succ} , що визначається відношенням кількості досягнутих цілей до загальної кількості запланованих;

показник надійності системи K_{rel} , який враховує ймовірність безвідмовної роботи апаратури протягом усього польоту;

середній час виконання завдання T_{avg} , що відображає ефективність використання часових ресурсів;

рівень ризику R_{risk} , пов'язаний із відхиленнями від траєкторії або ймовірністю втрати сигналу зв'язку;

енергоефективність E_{eff} , що характеризує відношення виконаної корисної роботи до витрат енергії.

З огляду на багатовимірність завдань і взаємозалежність показників доцільно використовувати багатокритеріальний підхід до оптимізації, у межах якого кожен критерій має власну вагу w_i , що відображає його відносну значущість для даного типу місії. Таким чином, при побудові математичної моделі, узагальнена функція ефективності може бути подана у вигляді:

$$F_{eff} = \sum_{i=1}^k w_i \cdot K_i, \text{ причому } \sum_{i=1}^k w_i = 1, \quad (1)$$

де K_i – нормалізовані показники ефективності;

w_i – вагові коефіцієнти, визначені експертним або адаптивним методом.

Така модель дозволяє здійснювати пріоритезацію цілей і визначати оптимальні стратегії управління залежно від контексту місії.

В умовах змінного операційного середовища БпЛА діють у ситуаціях, де повна інформація про зовнішні умови або майбутні стани системи недоступна. Така невизначеність має як об'єктивний (випадковий), так і суб'єктивний (інформаційно-обмежений) характер і є одним із ключових чинників, що впливають на стабільність та безпечність виконання місій. Для її кількісного врахування в системах планування та управління необхідне побудування математичних моделей, які дозволяють прогнозувати можливі відхилення, оцінювати ризики виникнення несприятливих подій та визначати стратегії мінімізації їх наслідків. У контексті даного дослідження розглядаються три основні методи моделювання невизначеності [6, 12, 17], що утворюють основу адаптивного управління:

1. Стохастичні процеси, які описують поведінку змінних середовища як функцій часу з випадковими параметрами. До цього класу належать моделі типу Маркова, процеси Пуассона, стохастичне інтегрування Іто, що дозволяють будувати динамічні сценарії розвитку подій. Стохастична еволюція стану системи подається як $dS(t) = f(S, t) dt + g(S, t) dW(t)$, де $W(t)$ — вінерівський процес, що моделює випадкові збурення середовища.

2. Сценарний аналіз, який полягає у формуванні множини можливих сценаріїв розвитку подій із відповідними ймовірностями реалізації. Такий підхід дозволяє моделювати критичні ситуації та оцінювати поведінку системи за кожного з них.

3. Байєсівські підходи, у межах яких невизначеність розглядається як розподіл імовірностей щодо гіпотез або параметрів моделі. Байєсівська інференція забезпечує можливість послідовного оновлення оцінок стану системи у режимі реального часу за надходження нових даних, через визначення апостеріорної імовірності $P(\theta | D)$ параметра θ після спостереження даних D , що на математичному рівні формалізується рівнянням $P(\theta | D) = (P(D | \theta) \cdot P(\theta)) / P(D)$.

З метою інтеграції результатів моделювання невизначеностей у процес управління розробляються методи оцінювання ризиків, які дають змогу визначати критичні режими функціонування системи [9-13]. Найбільш поширеними інструментами є:

матриця ризиків, що відображає взаємозв'язок між імовірністю виникнення події та тяжкістю її наслідків. Для кожного сценарію визначається значення ризику $R = P_i \times L_i$, де P_i – імовірність

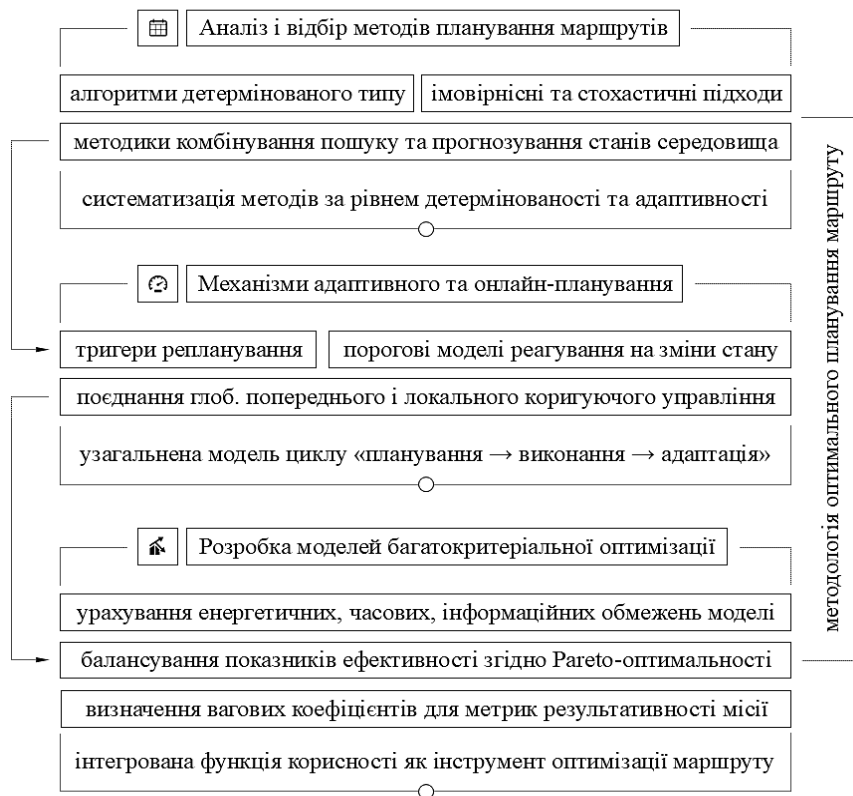


Рисунок 2 – Методологічна структура оптимального планування маршрутів БпЛА в адаптивному середовищі

реалізації події, L_t — рівень втрат або шкоди; імовірнісні межі відмов, що визначають порогові значення параметрів, за яких імовірність переходу системи у стан нестійкості перевищує допустимий рівень P_{lim} . Такий підхід дозволяє здійснювати моніторинг стану апарата та середовища з прогнозуванням моментів наближення до критичних режимів.

На основі зазначених методів формується схема процесу оцінки ризиків, яка включає такі етапи, як ідентифікація потенційних загроз і джерел невизначеності; кількісна оцінка імовірностей їх реалізації; визначення наслідків та рівня впливу на цілі місії; побудова матриці ризиків і встановлення порогів реагування; формування заходів адаптивного управління для зниження сукупного ризику. Для забезпечення відтворюваності аналізу доцільно використовувати мінімальний набір тестових сценаріїв, який охоплює типові ситуації: раптове погіршення погодних умов, переривання каналу зв'язку, збій навігаційних сенсорів, перевищення енергетичного ліміту та виникнення зовнішнього паразитного сигналу.

2. Комплексна методика планування й оптимізації маршрутів у змінних умовах

Після визначення характеристик змінного операційного середовища та побудови моделей невизначеностей наступним логічним кроком дослідження є формування ефективних методів планування траєкторій і оптимізації маршрутів БпЛА. Саме цей етап забезпечує практичну реалізацію аналітичних залежностей, що були отримані раніше, у вигляді алгоритмів, здатних приймати рішення у режимі реального часу. В

умовах динамічного середовища, де параметри системи та зовнішні впливи змінюються з високою частотою, особливою актуальністю набувають підходи, які поєднують точність математичного моделювання з гнучкістю адаптивного управління [7, 12, 17]. З метою досягнення цього передбачається послідовне виконання низки аналітичних та алгоритмічних процедур:

аналіз і відбір релевантних методів планування маршрутів із різним рівнем детермінованості, що дозволяють оцінити ефективність алгоритмів залежно від структури невизначеності;

розроблення механізмів адаптивного та онлайн-планування, орієнтованих на перерахунок траєкторії у випадку зміни стану середовища чи параметрів місії;

побудова моделей багатокритеріальної оптимізації, які враховують обмеження ресурсів, енергетичні й часові параметри, а також взаємозв'язки між показниками ефективності.

Сукупність цих складових створює теоретико-прикладну основу для розроблення систем автономного планування, що здатні забезпечити стійке та раціональне виконання польотів у непередбачуваних і змінних умовах експлуатації. На рис. 2 представлено методологічну структуру оптимального планування маршрутів БпЛА, яка охоплює три взаємопов'язані рівні: аналіз і класифікацію методів планування, механізми адаптивного та онлайн-планування, а також розробку моделей багатокритеріальної оптимізації.

Представлена на рис. 2 послідовність забезпечує реалізацію повного циклу “планування → виконання → адаптація”, що враховує

стохастичний характер змін середовища, ресурсні обмеження й критерії ефективності польотного завдання. Планування маршруту БпЛА є однією з центральних задач автономної навігації, що передбачає знаходження оптимальної або субоптимальної траєкторії руху в умовах обмежень і змінного середовища. На сьогоднішній день у науковій практиці сформувалися дві основні групи методів автоматичного планування маршруту: детерміновані та стохастичні, які відрізняються способом урахування невизначеності, складністю обчислень і гнучкістю реагування на зміни середовищних параметрів. Детерміновані алгоритми ґрунтуються на повній або частково відомій карті простору та використовують евристичні функції для пошуку найкоротшого або найменш затратного шляху. Їхньою перевагою є висока передбачуваність і гарантія знаходження оптимального рішення за відомих початкових умов, проте вони малоефективні у динамічних або частково спостережуваних середовищах. Для таких алгоритмів ключовими критеріями ефективності виступають час обчислення, точність рішення і стійкість до шуму у вхідних даних. На противагу цьому, стохастичні методи планування описують процес прийняття рішень у термінах імовірностей переходів між станами та очікуваної корисності дії. Такі підходи дозволяють враховувати невизначеність спостережень і випадковість змін середовища, формуючи гнучкі стратегії поведінки в реальному часі. Їхня ефективність визначається балансом між якістю рішення та обчислювальними витратами, що регулюється глибиною симуляцій і розміром простору станів. Вибір алгоритмічного підходу зумовлюється природою невизначеності: при статичному або квазістатичному середовищі доцільно застосовувати детерміновані методи з евристичним пошуком, тоді як у середовищах зі стохастичною динамікою перевагу мають імовірнісні або гібридні схеми, які дозволяють адаптивне репланування. Для об'єктивного порівняння алгоритмів у дослідженні надалі пропонується використовувати узагальнену схему оцінювання, що враховує три ключові показники: обчислювальну складність, ступінь адаптивності та ресурсні вимоги.

Виконання польоту в умовах змінного операційного середовища потребує від системи управління не лише здатності до попереднього планування, а й можливості динамічного коригування траєкторії у процесі руху БпЛА. Така властивість реалізується через механізми репланування, які забезпечують адаптацію маршруту у відповідь на непередбачувані зміни зовнішніх умов або внутрішніх параметрів системи. Репланування виступає ключовою складовою адаптивного управління, що дозволяє підтримувати ефективність і безпечність польоту при порушенні первинних припущень моделі середовища [7, 12, 17]. Основу такого підходу становлять тригери активації репланування, які поділяються на два основні типи:

подієво-орієнтовані тригери, що спрацьовують

у момент настання певної події, як то виявлення нової перешкоди, втрати зв'язку, зміни координат цілі або відхилення від запланованої траєкторії. Ці тригери забезпечують негайне перерахування маршруту й мінімізацію часу реакції системи;

порогово-орієнтовані тригери, які активуються після перевищення наперед заданого порогового значення контрольного параметра, як то рівня енергоспоживання, допустимого радіуса відхилення, температури або показника ризику. Такий підхід дає змогу уникати надмірних обчислень і підтримувати баланс між стабільністю та гнучкістю планування.

Ефективним напрямом розвитку систем репланування є створення гібридних схем, у межах яких поєднуються глобальне попереднє планування на стратегічному рівні та локальне адаптивне управління в межах поточного операційного простору [10, 12, 17]. Глобальний план визначає оптимальний маршрут і ключові контрольні точки місії, тоді як локальний рівень відповідає за корекцію траєкторії у відповідь на зміни навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє забезпечити високу стійкість системи без надмірних витрат обчислювальних ресурсів, а також узгодженість між короткотерміновими рішеннями та загальною стратегією місії. Цикл адаптивного управління, таким чином, може бути формалізовано у вигляді послідовності дій “планування → виконання → моніторинг середовища → оновлення оцінки → репланування”, де кожен етап взаємодіє з попереднім і наступним через обмін даними про стан системи та середовища. Псевдокод цього циклу в узагальненому вигляді пропонується подати таким чином:

```
# Ініціалізація параметрів місії
initialize_mission(goals, constraints)
# Побудова первинного глобального маршруту
global_route =
plan_global_path(environment_model)
# Основний цикл виконання місії
while not mission_completed():
# Виконання поточної ділянки маршруту
execute_local_trajectory(global_route)
# Отримання актуального стану середовища
E_t = observe_environment()
# Перевірка умов для ре-планування
if trigger_event_detected(E_t) or
threshold_exceeded(E_t):
# Оновлення моделі середовища
environment_model =
update_environment_model(E_t)
# Перерахунок локальної ділянки маршруту
global_route =
replan_local_path(environment_model)
# Продовження виконання місії
continue_mission(global_route)
# Завершення місії та фіксація результатів
finalize_mission_report()
```

Застосування таких адаптивних циклів дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з невизначеністю середовища, забезпечити стабільність поведінки

безпілотної системи та досягти високої узгодженості між плануванням, виконанням і прийняттям рішень у режимі реального часу.

Одним із ключових аспектів планування маршрутів БпЛА є врахування ресурсних обмежень, що визначають реальні межі ефективності місії. З огляду на обмежений енергетичний потенціал, обчислювальні ресурси, пропускну здатність каналів зв'язку та фізичні характеристики корисного навантаження, система управління має забезпечити досягнення цілей із максимально можливою результативністю за наявності множини конкуруючих критеріїв. Ці фактори створюють багатовимірний простір прийняття рішень, у якому досягнення глобального оптимуму є недосяжним, що, у свою чергу зумовлює потребу у використанні багатокритеріальних методів оптимізації. Основними видами обмежень, що мають бути враховані при плануванні місії [5, 7, 13], є наступні категорії:

енергетичні обмеження, пов'язані з кінцевою ємністю джерел живлення, залежністю споживання енергії від швидкості, навантаження та режиму польоту. Енергетична модель описується функцією $E = f(v, m, t)$, де змінна v відображає показник швидкості, m – маса, t – час, а метою виконання процедури оптимізації є мінімізація сумарних витрат енергії за умови збереження досяжності цілі;

інформаційно-комунікаційні обмеження, які визначаються пропускну здатністю каналів зв'язку, рівнем завад та затримками передачі даних. Їхнє порушення призводить до втрати зворотного зв'язку або несвоєчасного оновлення моделі

середовища, що унеможливорює ефективне репланування.

фізичні та логістичні обмеження, до яких належать допустиме навантаження, габарити корисного вантажу, швидкісні межі, висотні профілі, а також часові рамки, у межах яких має бути виконано завдання.

Для пошуку компромісу між різними показниками ефективності застосовуються багатокритеріальні методи оптимізації [7, 10, 15], серед яких найпоширенішими є:

Pareto-оптимізація, яка дозволяє знайти множину недомінованих рішень, за яких покращення одного критерію неможливе без погіршення іншого;

метод вагових коефіцієнтів, у межах якого кожен критерій має власну вагу w_i , що визначається на підставі його відносної важливості, причому узагальнена цільова функція визначається як сума $w_n \cdot f_n(x)$ по $n \in [1; N]$, де $f_i(x)$ — нормалізовані функції критеріїв, x — вектор параметрів управління;

субоптимізаційні методи, які застосовуються для задач із великим простором станів або обмеженими обчислювальними ресурсами і дозволяють знаходити рішення, що наближено мінімізують цільову функцію при прийнятній точності й швидкості розрахунку.

Для практичної реалізації зазначених підходів доцільно формувати матрицю відповідності сценаріїв і методів оптимізації, яка може мати структуру, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Відповідність сценаріїв місій, наявних обмежень і методів оптимізації маршрутів БпЛА [7, 10, 15]

Сценарій місії	Ключові обмеження	Динамічність середовища	Метод оптимізації	Критерій ефективності
доставка вантажу	енергетичні часові	низький рівень	вагові коефіцієнти	мінімізація споживання енергії
розвідувальна операція	комунікаційні безпекові	середній рівень	Pareto-оптимізація	максимізація точності спостереження
пошуково-рятувальна операція	енергетичні часові інформаційні	високий рівень	субоптимізація	мінімізація часу реагування
патрулювання (обмеж. зв'язок)	комунікаційні	середній рівень	гібрид. Pareto–вагова	підтримка стабільності зв'язку

Таке представлення дозволяє системно пов'язати умови експлуатації, доступні ресурси та вибір оптимізаційного інструментарію. Використання багатокритеріальних підходів у поєднанні з оцінкою обмежень забезпечує підвищення ефективності місій, збалансування енергетичних і часових витрат, а також підвищення стійкості системи до змін параметрів середовища.

3. Організація місії на основі архітектури управління з оцінюванням результатів

Після визначення методів планування та оптимізації маршрутів, має бути проведено

переведення дослідження у практичну площину, що, своєю чергою, включає у себе проведення організації процесу виконання місії та управління польотом у реальному середовищі. На цьому етапі визначальним є узгодження теоретичних моделей з архітектурою системи керування, забезпечення ефективної взаємодії її компонентів і формування механізмів прийняття рішень, здатних функціонувати в умовах динамічної невизначеності. Для досягнення цього надалі передбачається послідовне виконання наступного набору взаємопов'язаних завдань:

побудова архітектури управління польотом, що охоплює планувальні, аналітичні, комунікаційні та виконавчі модулі, а також встановлення принципів їх взаємодії;

розроблення стратегій ухвалення рішень у реальному часі з урахуванням рівня автономності системи та можливості втручання оператора;

проведення валідації й експериментальної перевірки ефективності запропонованих алгоритмів на основі симуляцій, стендових

випробувань і польотів у контрольованих умовах.

Сукупність цих складових формує завершений контур функціонування системи управління місією, що забезпечує підґрунтя для інтеграції адаптивних рішень у практичні сценарії використання БпЛА.

Рис. 3 ілюструє методологічну основу адаптивного управління польотами, що поєднує класифікацію змін операційного середовища, формалізацію параметрів операційного простору, оцінювання вимог ефективності та аналіз ризиків.

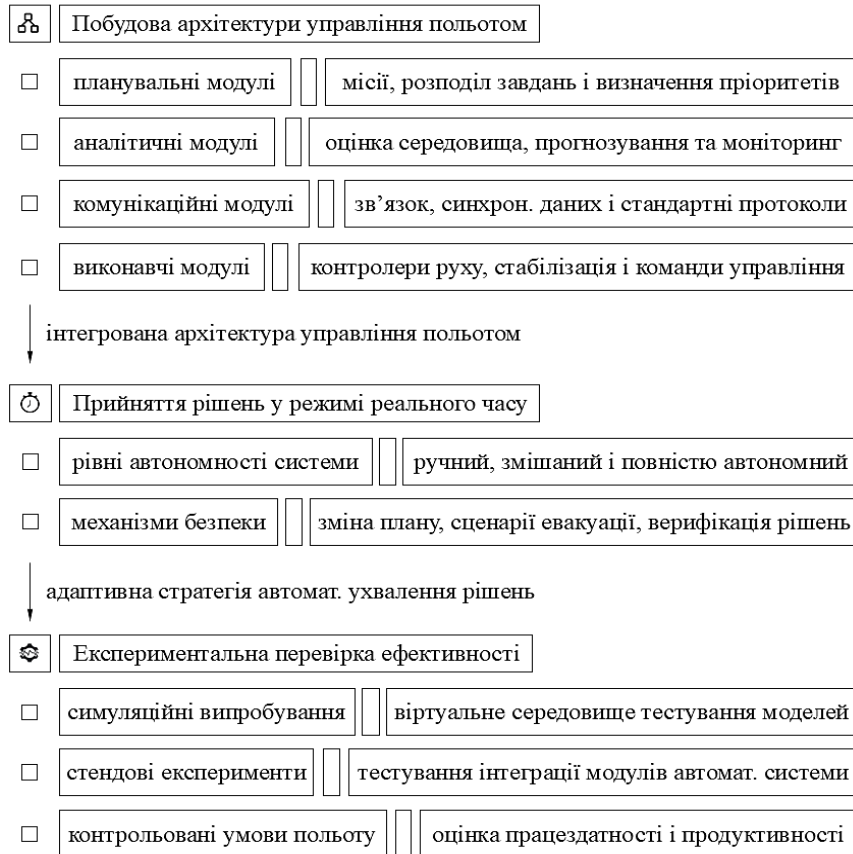


Рисунок 3 – Методологічна основа адаптивного управління польотами в умовах динамічного операційного середовища

Обговорення

Представлена структура окреслює взаємозв'язок між поведінковими факторами, стохастичними характеристиками середовища та критеріями результативності місії, формуючи базу для побудови моделей прогнозування, репланування й кількісної оцінки невизначеності.

Архітектура управління польотом БпЛА визначає структурну організацію функціональних модулів, що забезпечують виконання місії у режимі реального часу. Її побудова ґрунтується на принципах модульності, ієрархічності та інформаційної сумісності, що дозволяє забезпечити узгоджену взаємодію між рівнями планування, аналізу, керування й контролю [13, 16, 17]. Основу архітектури становить чотирирівнева система, до складу якої входять: планувальник місії, модуль оцінки середовища, контролер польоту та модуль зв'язку і прийняття рішень. Планувальник місії виконує стратегічні функції, як то формує траєкторію польоту, розподіляє завдання між

підсистемами, задає пріоритети цілей та забезпечує відповідність операційних параметрів встановленим обмеженням. Модуль оцінки середовища здійснює збір і синтез даних із сенсорів, прогнозує зміну зовнішніх умов та передає скориговані параметри до планувальника й контролера. Контролер польоту реалізує низькорівневе управління динамікою апарата, стабілізацію та корекцію руху відповідно до заданої траєкторії. Модуль зв'язку і прийняття рішень забезпечує двосторонню комунікацію між апаратом і наземним пунктом керування, здійснює обмін телеметричними даними та координує процес взаємодії між автономними підсистемами. Інформаційні потоки між компонентами мають бути організовані за принципом асинхронного обміну, що гарантує мінімальні затримки в передачі даних. Протоколи комунікації повинні підтримувати стандарти відкритої взаємодії, забезпечуючи інтеграцію різноманітних апаратних і програмних рішень. Особливе значення мають

механізми синхронізації та верифікації даних, які гарантують узгодженість між вимірними й розрахунковими параметрами. Загалом така архітектура забезпечує реалізацію замкненого контуру управління, у межах якого кожен модуль виконує чітко визначену функцію, а система в цілому демонструє властивості адаптивності, відмовостійкості й масштабованості.

Процес ухвалення рішень у системах управління польотом БПЛА визначається необхідністю забезпечення безперервного функціонування в умовах динамічного середовища, обмежених ресурсів і потенційних відмов окремих підсистем. При цьому критично важливою є наявність адаптивного механізму, який дозволяє системі змінювати стратегію поведінки залежно від поточного контексту, одночасно зберігаючи контрольованість і прозорість дій для оператора. Сучасні архітектури управління передбачають ієрархію рівнів автономності, що охоплює діапазон від повністю ручного керування до автономного виконання місії без участі оператора. На нижчому рівні оператор контролює усі параметри польоту в режимі реального часу, тоді як на проміжних рівнях система виконує частину функцій автоматично (, залишаючи людині стратегічні рішення. На найвищому рівні автономності оператор виконує функції моніторингу та має право втручання у випадку позаштатної ситуації. Визначення точок втручання оператора базується на критеріях безпеки, таких як вихід параметрів за межі допустимих значень, втрата зв'язку, конфлікт між сенсорними даними або загроза зіткнення. Для підвищення надійності системи реалізуються механізми забезпечення надійності експлуатації аероплатформи [9, 13, 16], що передбачають:

відкат плану (Plan Rollback, PRB), що відповідає поверненню до останнього стабільного стану у разі виявлення помилки чи некоректного рішення;

евакуаційні сценарії (Emergency Fallback, EFB) як перехід до безпечного режиму польоту або повернення на базову точку у разі критичної відмови;

верифікацію рішень (Decision Verification, DV) як перевірку узгодженості між розрахунковими діями та поточними умовами, що запобігає виконанню помилкових команд.

Ключову роль у цьому процесі відіграє інтерфейс “людина-машина” (Human-Machine Interface, HMI), який забезпечує візуалізацію стану системи, параметрів середовища, прогнозів траєкторії та індикаторів ризику. Ефективний HMI має бути мінімалістичним, інформативним і контекстно чутливим, відображаючи лише релевантні дані для ухвалення рішення. До типових елементів інтерфейсу належать карта маршруту з актуальними ризиковими зонами, панель станів системи, повідомлення про події, прогноз часу до завершення місії та рівень залишкового ресурсу. Передача управління між системою й оператором здійснюється за формалізованими критеріями, серед яких рівень достовірності даних сенсорів, перевищення порогів ризику або втрачена

стабільність зворотного зв'язку. Такий підхід забезпечує баланс між автономністю системи та контролем з боку людини, що є ключовою умовою надійності і безпечності експлуатації безпілотних комплексів у реальному операційному середовищі.

Останнім етапом дослідження є валідація запропонованих алгоритмів і архітектур управління, що має на меті підтвердження їхньої працездатності, надійності та відповідності заданим критеріям ефективності [9-12, 16]. Перевірка здійснюється за допомогою багаторівневої експериментальної схеми, яка охоплює три послідовні етапи: моделювання, стендові випробування та польоти в контрольованих умовах. На етапі симуляцій створюються віртуальні середовища з різним ступенем невизначеності, у межах яких відтворюються типові сценарії місій. Це дозволяє дослідити поведінку системи при зміні метеоумов, параметрів зв'язку або структурних відмов компонентів. Стендові тести проводяться з метою перевірки апаратно-програмної інтеграції модулів, оцінки затримок у передачі даних і коректності взаємодії між підсистемами. Завершальний етап передбачає реальні польоти з поступовим ускладненням умов, що забезпечує перехід від теоретичної до практичної апробації результатів. Оцінювання результатів здійснюється на основі системи кількісних метрик ефективності, які відображають ключові характеристики функціонування безпіотної системи, що були розглянуті у першому розділі, а також коефіцієнт ефективності використання ресурсів ROI, як співвідношення між досягнутими результатами та витраченими ресурсами. Запропонована методологія забезпечує науково обґрунтовані засади для подальшого розвитку інтелектуальних систем автономного управління БПЛА.

Висновки

Дослідження присвячено проблемі планування, виконання та управління польотами БПЛА в умовах змінного операційного середовища. Основна увага приділена побудові інтегрованої методології адаптивного управління, яка враховує стохастичну природу зовнішніх впливів, ресурсні обмеження апаратно-програмної платформи та необхідність прийняття рішень у режимі реального часу. У результаті проведеного дослідження:

1. Узагальнено закономірності функціонування БПЛА у динамічному операційному середовищі, класифіковано типи змін та визначено їх вплив на стабільність польоту, точність навігації й ефективність виконання місій;

2. Розроблено математичні моделі оцінки стану середовища у вигляді векторів стану, часових рядів і ймовірнісних описів, що дозволяють кількісно враховувати невизначеність і будувати сценарії прогнозування поведінки системи;

3. Сформовано комплексну методику оптимального планування маршрутів, що включає класифікацію детермінованих і стохастичних алгоритмів, механізми онлайн-планування та репланування на основі тригерів, а також моделі

багатокритеріальної оптимізації з урахуванням енергетичних, часових і комунікаційних обмежень;

4. Обґрунтовано архітектуру системи управління місією, побудовану за принципами модульності й ієрархічності, яка поєднує рівні планування, оцінки середовища, управління динамікою та комунікаційної взаємодії, забезпечуючи узгодженість і відмовостійкість функціонування;

5. Розроблено підходи до валідації та експериментальної перевірки ефективності алгоритмів, що охоплюють моделювання, стендові випробування й контрольовані польоти; визначено систему метрик для кількісного оцінювання ефективності управління польотом.

Отримані результати мають суттєве практичне значення для підвищення надійності, автономності та енергоефективності безпілотних систем, які функціонують у складних і динамічних умовах. Запропонована методологія створює науково обґрунтовану основу для розроблення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень і впровадження адаптивних стратегій управління у процесі виконання місій різного типу.

Список використаних джерел

1. Jazairy, A., & Persson, M. (2024). Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 36(7). <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2023-0149>.
2. Kwakye, A. D., Jennions, I. K., & Ezhilarasu, C. M. (2024). Platform health management for aircraft maintenance – a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 238(3). <https://doi.org/10.1177/09544100231219736>.
3. Mendu, B., & Mbuli, N. (2025). State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects. *Drones*, 9(4), 265. <https://doi.org/10.3390/drones9040265>.
4. Zhang, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., & Qian, B. (2024). Strong Electromagnetic Interference and Protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
5. Gu, R., Zhao, Y., & Ren, X. (2025). Integrating wind field analysis in UAV path planning: Enhancing safety and energy efficiency for urban logistics. *Chinese Journal of Aeronautics*, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103605>.
6. Jarraya, I., Al-Batati, A., Kadri, M. B., Abdelkader, M., Ammar, A., Boulila, W., & Koubaa, A. (2025). GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: Analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*, 6, 9. <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-025-00162-z>.
7. Ahmed, G., & Sheltami, T. (2024). Novel energy-aware 3D UAV path planning and collision avoidance using receding horizon and optimization-based control. *Drones*, 8(11), 682. <https://doi.org/10.3390/drones8110682>.
8. Ahmed, G., Sheltami, T., & Shakshuki, E. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.
9. Jiang, Z., Song, T., Yang, B., & Song, G. (2024). Fault-tolerant control for multi-UAV exploration system via reinforcement learning algorithm. *Aerospace*, 11(5), 372. <https://doi.org/10.3390/aerospace11050372>.
10. Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. (2024). A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications. *Remote Sensing*, 16(21), 4019. <https://doi.org/10.3390/rs16214019>.
11. Huang, H., Li, Y., Song, G., & Gai, W. (2024). Deep reinforcement learning-driven UAV data collection path planning: A study on minimizing AoI. *Electronics*, 13(10), 1871. <https://doi.org/10.3390/electronics13101871>.
12. Garzelli, A., Benedikter, B., Zavoli, A., Martínez de Dios, J. R., Suarez, A., & Ollero, A. (2025). Stochastic path planning with obstacle avoidance for UAVs using covariance control. *Applied Sciences*, 15(19), 10469. <https://doi.org/10.3390/app151910469>.
13. Negru, S. A., Geragersian, P., Petrunin, I., & Guo, W. (2024). Resilient multi-sensor UAV navigation with a hybrid federated fusion architecture. *Sensors*, 24(3), 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>.
14. Ogunbunmi, S., Chen, Y., Blasch, E., & Chen, G. (2024). A survey on reputation systems for UAV networks. *Drones*, 8(6), 253. <https://doi.org/10.3390/drones8060253>.
15. Ahmed, G., Sheltami, T., Ghaleb, M., Hamdan, M., Mahmoud, A., & Yasar, A. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.
16. Hashim, H. A. (2025). Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives. *Results in Engineering*, 25, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>.
17. Wang, X.-F., Jiang, J., & Chen, W.-H. (2024). A hierarchical control framework for autonomous decision-making systems: Integrating HMDP and MPC. *arXiv preprint arXiv:2401.06833*. <https://arxiv.org/abs/2401.06833>.
- Chen, Z., Zhu, E., Guo, Z., Zhang, P., Liu, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2025). Predictive autonomy for UAV remote sensing: A survey of video prediction. *Remote Sensing*, 17(20), 3423. <https://doi.org/10.3390/rs17203423>.

Volodymyr Malovanyi (candidate of technical sciences)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Volodymyr Zhurid

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Igor Vasin

<https://orcid.org/0000-0002-8362-9036>

Ruslan Yakovliev

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

MISSION PLANNING AND EXECUTION OF UAV FLIGHTS IN A DYNAMIC OPERATIONAL ENVIRONMENT

A comprehensive analysis of current scientific approaches to the process of planning and executing unmanned aerial vehicle flights in a dynamic operational environment is undertaken. Particular attention is paid to the formalization of environmental parameters that undergo constant changes, including meteorological, topographic, electronic-jamming, and information-communication factors, which determine the level of risk, navigation accuracy, and stability of sensor and actuator subsystems. A classification of variable operational conditions by their impact on trajectory characteristics of flight is proposed, enabling the development of adaptive decision-making models. Requirements for constructing mathematical models to evaluate the state of the environment in the form of state vectors, time series, and probabilistic descriptions are formulated, allowing for uncertainty during the execution of various mission types to be taken into account. Modern methods of route optimization are analyzed, combining deterministic trajectory-planning algorithms with elements of stochastic optimization. The advisability of employing multi-criteria approaches is substantiated, ensuring a balance between energy efficiency, execution time, flight safety, and quality of collected information. A generalized concept of an adaptive control cycle is developed, including stages of pre-planning, environment monitoring, route correction, and evaluation of mission outcome. It is shown that the application of event-triggered replanning mechanisms allows for timely response to changes in external conditions, minimizing risks of instability and trajectory deviation. Architectural solutions for implementing a UAV flight-control system are examined, including modules for prediction, environment assessment, local trajectory optimization, and operator-system interaction interface. Principles for integration of information flows from sensor channels, communication systems, and navigation blocks to ensure coherent functioning of software components are defined. Approaches to validation and experimental verification of the proposed algorithms' effectiveness are described. A system of metrics for quantitative evaluation of flight-control effectiveness is proposed, including indicators of positioning accuracy, response speed, energy consumption, navigational-decision stability, and mission-execution risk level. It is demonstrated that the introduction of adaptive planning and control algorithms increases reliability and robustness of unmanned aerial systems in complex and dynamic conditions, reduces the influence of environmental uncertainty, and ensures effective execution of flight missions in real-time mode.

Key words: *unmanned aerial vehicle, flight planning, dynamic operational environment, adaptive control, multi-criteria optimization, decision-support system.*

References

1. Jazairy, A., & Persson, M. (2024). Drones in last-mile delivery: A systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 36(7). <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2023-0149>.
2. Kwakye, A. D., Jennions, I. K., & Ezhilarasu, C. M. (2024). Platform health management for aircraft maintenance – a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 238(3). <https://doi.org/10.1177/09544100231219736>.
3. Mendu, B., & Mbuli, N. (2025). State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects. *Drones*, 9(4), 265. <https://doi.org/10.3390/drones9040265>.
4. Zhang, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., & Qian, B. (2024). Strong Electromagnetic Interference and Protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
5. Gu, R., Zhao, Y., & Ren, X. (2025). Integrating wind field analysis in UAV path planning: Enhancing safety and energy efficiency for urban logistics. *Chinese Journal of Aeronautics*, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103605>.
6. Jarraya, I., Al-Batati, A., Kadri, M. B., Abdelkader, M., Ammar, A., Boulila, W., & Koubaa, A. (2025). GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: Analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*, 6, 9. <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-025-00162-z>.
7. Ahmed, G., & Sheltami, T. (2024). Novel energy-aware 3D UAV path planning and collision avoidance using receding horizon and optimization-based control. *Drones*, 8(11), 682. <https://doi.org/10.3390/drones8110682>.
8. Ahmed, G., Sheltami, T., & Shakshuki, E. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.

9. Jiang, Z., Song, T., Yang, B., & Song, G. (2024). Fault-tolerant control for multi-UAV exploration system via reinforcement learning algorithm. *Aerospace*, 11(5), 372. <https://doi.org/10.3390/aerospace11050372>.
10. Debnath, D., Vanegas, F., Sandino, J., Hawary, A. F., & Gonzalez, F. (2024). A review of UAV path-planning algorithms and obstacle avoidance methods for remote sensing applications. *Remote Sensing*, 16(21), 4019. <https://doi.org/10.3390/rs16214019>.
11. Huang, H., Li, Y., Song, G., & Gai, W. (2024). Deep reinforcement learning-driven UAV data collection path planning: A study on minimizing AoI. *Electronics*, 13(10), 1871. <https://doi.org/10.3390/electronics13101871>.
12. Garzelli, A., Benedikter, B., Zavoli, A., Martínez de Dios, J. R., Suarez, A., & Ollero, A. (2025). Stochastic path planning with obstacle avoidance for UAVs using covariance control. *Applied Sciences*, 15(19), 10469. <https://doi.org/10.3390/app151910469>.
13. Negru, S. A., Geragersian, P., Petrunin, I., & Guo, W. (2024). Resilient multi-sensor UAV navigation with a hybrid federated fusion architecture. *Sensors*, 24(3), 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>.
14. Ogunbunmi, S., Chen, Y., Blasch, E., & Chen, G. (2024). A survey on reputation systems for UAV networks. *Drones*, 8(6), 253. <https://doi.org/10.3390/drones8060253>.
15. Ahmed, G., Sheltami, T., Ghaleb, M., Hamdan, M., Mahmoud, A., & Yasar, A. (2024). Energy-efficient Internet of Drones path-planning study using meta-heuristic algorithms. *Applied Sciences*, 14(6), 2418. <https://doi.org/10.3390/app14062418>.
16. Hashim, H. A. (2025). Advances in UAV avionics systems architecture, classification and integration: A comprehensive review and future perspectives. *Results in Engineering*, 25, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103786>.
17. Wang, X.-F., Jiang, J., & Chen, W.-H. (2024). A hierarchical control framework for autonomous decision-making systems: Integrating HMDP and MPC. *arXiv preprint arXiv:2401.06833*. <https://arxiv.org/abs/2401.06833>.
18. Chen, Z., Zhu, E., Guo, Z., Zhang, P., Liu, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2025). Predictive autonomy for UAV remote sensing: A survey of video prediction. *Remote Sensing*, 17(20), 3423. <https://doi.org/10.3390/rs17203423>.

Матвєєв Валерій Валерійович

<https://orcid.org/0009-0007-8430-2418>

Стушанський Юрій Васильович

<https://orcid.org/0000-0002-3021-6756>

Волканін Євген Євгенович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0003-3507-1987>

Мальований Володимир Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

МЕТОДИКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ ПОХИБКИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ КІЛЬКІСНИХ КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ МЕТОДУ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ЗАЛЕЖНО ВІД НОРМАЛІЗОВАНОЇ ЧАСТОТИ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ

Розглянуто енергетичний підхід до оцінювання якості відновлення сигналів після дискретизації. Запропоновано метод аналізу спектральної густини потужності похибки інтерполяції для чотирьох базових методів. Встановлено залежності між *normalized mean square error* та *normalized sampling rate* у логарифмічному масштабі. Виведено емпіричні коефіцієнти для швидкої оцінки якості відновлення без повного математичного моделювання. Показано, що перехідна зона між методами знаходиться при *normalized sampling rate* = 1.8–2.2, що дозволяє оптимізувати вибір алгоритму інтерполяції. Результати дослідження мають практичне значення для проектування систем радіоелектронної боротьби, зокрема при розробці приймачів цифрової обробки сигналів у комплексах радіоперехоплення та радіорозвідки. Встановлені критерії вибору методу інтерполяції дозволяють оптимізувати співвідношення між точністю відновлення складних радіосигналів та обчислювальними ресурсами бортових систем РЕБ в умовах реального часу.

Ключові слова: РЕБ, енергетична похибка відновлення, нормалізована частота дискретизації, спектральна густина похибки, оптимізація інтерполяції.

Вступ

Цифрова обробка інформації потребує перетворення аналогових сигналів у послідовність дискретних відліків та подальшого відновлення. Класична теорія дискретизації, сформульована В.А. Котельниковим (1933 р.), К. Шенноном (1949 р.) [1] та Г. Найквістом (1928 р.) [2], визначає мінімально необхідну швидкість взяття відліків, проте не розглядає енергетичні аспекти похибки при практичних методах інтерполяції.

Існуючі дослідження [3–5] зосереджуються на аналізі максимальної або середньої похибки окремих методів, проте бракує систематичного порівняння енергетичних характеристик різних підходів у єдиній системі координат. Особливий інтерес становить визначення оптимального співвідношення між частотою дискретизації та складністю алгоритму відновлення з точки зору енергії похибки.

Мета роботи — розробка методики енергетичного аналізу похибки відновлення та встановлення кількісних критеріїв вибору методу інтерполяції залежно від нормалізованої частоти дискретизації.

Матеріали та методи

Енергетична модель похибки.

Розглянемо сигнал $s(t)$ із спектром, обмеженим частотою $\Omega_{\max} = 2\pi F_{\max}$. Після дискретизації з періодом T_s отримуємо послідовність $\{s_n\}$, $n \in \mathbb{Z}$. Відновлення виконується інтерполятором $I\{\cdot\}$:

$$\hat{s}(t) = I\{s_n, t\} \quad (1)$$

Введемо нормалізовану частоту дискретизації:

$$\rho = \frac{\omega_s}{2\Omega_{\max}} = \frac{\pi}{T_s \Omega_{\max}} \quad (2)$$

де $\omega_s = 2\pi/T_s$ — кругова частота дискретизації.

При $\rho = 1$ виконується критерій Найквіста, при $\rho > 1$ — надлишкова дискретизація.

Енергію похибки відновлення на інтервалі $[0, T]$ визначимо як:

$$E_{err} = \int_0^T [s(t) - \hat{s}(t)]^2 dt \quad (3)$$

Нормалізована середньоквадратична похибка (NMSE):

$$NMSE = \frac{E_{err}}{E_s} = \frac{\int_0^T [s(t) - \hat{s}(t)]^2 dt}{\int_0^T s^2(t) dt} \quad (4)$$

У частотній області через теорему Парсеваля:

$$NMSE = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega) - \hat{S}(\omega)|^2 d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

Тестовий сигнал. Як базовий сигнал використаємо модельований гармонічний процес із частотою, близькою до верхньої межі спектру:

$$s(t) = \sin(\alpha\Omega_{\max}t), \quad 0.8 \leq \alpha \leq 1.0 \quad (6)$$

Параметр α дозволяє оцінити чутливість методів до високочастотних компонент. Енергія сигналу на періоді $T = 2\pi/(\alpha\Omega_{\max})$:

$$E_s = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\alpha\Omega_{\max}} \quad (7)$$

Спектральний аналіз похибки. Для кожного методу інтерполяції визначимо передавальну функцію $H_I(\omega)$, що зв'яже спектр оригінального та відновленого сигналів:

$$\hat{S}(\omega) = H_I(\omega) \cdot S_{\text{sampld}}(\omega) \quad (8)$$

Функція помилки:

$$H_{\text{err}}(\omega) = 1 - H_I(\omega) \quad (9)$$

Спектральна густина потужності похибки:

$$P_{\text{err}}(\omega) = |H_{\text{err}}(\omega)|^2 \cdot |S(\omega)|^2 \quad (10)$$

Результати

Ступінчаста апроксимація (Zero-Order Hold).
Передавальна функція у частотній області:

$$H_{ZOH}(\omega) = \frac{\sin(\omega Ts/2)}{\omega Ts/2} \cdot e^{-j\omega Ts/2} \quad (11)$$

Амплітудна характеристика має спад sinc-типу. Для нормалізованої частоти $\theta = \omega/\Omega_{\max}$:

$$|H_{ZOH}(\theta)| = \left| \frac{\sin(\pi\theta/\rho)}{\pi\theta/\rho} \right| \quad (12)$$

На частоті $\alpha \cdot \Omega_{\max}$:

$$|H_{ZOH}(\alpha)| = \left| \frac{\sin(\pi\alpha/\rho)}{\pi\alpha/\rho} \right| \quad (13)$$

Функція помилки:

$$|H_{\text{err}}(\alpha)| = \left| 1 - \frac{\sin(\pi\alpha/\rho)}{\pi\alpha/\rho} \right| \quad (14)$$

Для $\alpha \approx 1$ та $\rho \gg 1$ розкладання в ряд дає:

$$|H_{\text{err}}|^2 \sim \frac{\pi^2}{6\rho^2} \quad (15)$$

Нормалізована MSE:

$$NMSE_{ZOH} \sim \frac{\pi^2}{6\rho^2} = 1.645 \cdot \rho^{-2} \quad (16)$$

У децибелах:

$$NMSE_{\text{dB}} = 10\log_{10}(1.645) - 20\log_{10}(\rho) \approx 2.16 - 20\log_{10}(\rho) \quad (17)$$

Лінійна інтерполяція (First-Order Hold).

Передавальна функція:

$$H_{FOH}(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega Ts/2)}{\omega Ts/2} \right]^2 \quad (18)$$

Це квадрат sinc-функції, що забезпечує швидший спад на високих частотах. Для нормалізованої частоти:

$$H_{FOH}(\theta) = \left[\frac{\sin(\pi\theta/\rho)}{\pi\theta/\rho} \right]^2 \quad (19)$$

Функція помилки для $\alpha = 1$:

$$|H_{\text{err}}|^2 \sim \frac{\pi^4}{45\rho^4} \quad (20)$$

Нормалізована MSE:

$$NMSE_{FOH} \sim \frac{\pi^4}{45\rho^4} = 2.166 \cdot \rho^{-4} \quad (21)$$

У децибелах:

$$NMSE_{\text{dB}} \approx 3.36 - 40\log_{10}(\rho) \quad (22)$$

Кубічна конволюційна інтерполяція/

Використаємо апроксимацію sinc-функції кубічним ядром:

$$K(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1, & 0 \leq |x| < 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a, & 1 \leq |x| < 2 \\ 0, & |x| \geq 2 \end{cases} \quad (23)$$

де параметр $a = -0.5$ (кубічний B-сплайн) або $a = -0.75$ (оптимізація за Keys).

Передавальна функція (для $a = -0.5$):

$$H_{\text{cubic}}(\omega) \sim 1 - \frac{(\omega Ts)^6}{720} \quad (24)$$

При малих частотах похибка апроксимується:

$$|H_{\text{err}}|^2 \sim \frac{(\pi\theta/\rho)^{12}}{5.18 \cdot 10^5} \quad (25)$$

Для $\theta \approx 1$:

$$NMSE_{\text{cubic}} \sim \frac{\pi^{12}}{5.18 \cdot 10^5 \rho^{12}} = 3.68 \cdot 10^{-1} \cdot \rho^{-12} \quad (26)$$

У децибелах:

$$NMSE_{\text{dB}} \approx -4.34 - 120\log_{10}(\rho) \quad (27)$$

Апроксимація ідеального відновлення.

Усічення формули Котельникова до $2M + 1$ відліків:

$$\hat{s}(t) = \sum_{n=-M}^M s_{k+n} \cdot \sin c\left(\frac{\pi(t - nTs)}{Ts}\right) \quad (28)$$

$$E_{\text{tail}} \sim \frac{1}{n^2} \quad (29)$$

$$\text{NMSE}_{\text{dB}} \approx -24.6 \text{ дБ} \quad (32)$$

(незалежно від ρ при $\rho \geq 1$).

Сумарна похибка усічення:

$$\text{NMSE}_{\text{sinc-M}} \sim \frac{\zeta(2)}{2M^2} = \frac{\pi^2}{12M^2} \quad (30)$$

де $\zeta(2) = \pi^2/6$ — дзета-функція Рімана.

Для $M = 16$:

$$\text{NMSE}_{\text{sinc-16}} \approx 3.43 \times 10^{-3} \quad (31)$$

У децибелах:

Обговорення

Компаративний аналіз.

Узагальнено отримані залежності у вигляді степеневих законів:

$$\text{NMSE}_i = A_i \cdot \rho^{-\beta_i} \quad (33)$$

де A_i — амплітудний коефіцієнт, β_i — показник степеня.

Таблиця 1

Параметри степеневих апроксимацій				
Метод	A_i	β_i	NMSE_{dB} при $\rho = 1.5$	NMSE_{dB} при $\rho = 2.5$
ZOH	1.645	2	-1.37 дБ	-5.45 дБ
FOH	2.166	4	-10.70 дБ	-22.89 дБ
Cubic	0.368	12	-39.78 дБ	-78.65 дБ
Sinc-16	0.00343	0	-24.65 дБ	-24.65 дБ

Таблиця 2

Точки еквівалентності методів		
Порівняння	$\rho_{\text{crossover}}$	NMSE_{dB} у точці
ZOH $\leftrightarrow$ FOH	1.28	-0.21 дБ
FOH $\leftrightarrow$ Cubic	1.87	-12.62 дБ
Cubic $\leftrightarrow$ Sinc	2.31	-24.65 дБ

Енергетична ефективність.

Введемо коефіцієнт енергетичної ефективності:

$$\eta_E = -\text{NMSE}_{\text{dB}}/C_{\text{comp}} \quad (34)$$

де C_{comp} — відносна обчислювальна складність (операцій на точку): ZOH: $C = 1$ (базова одиниця); FOH: $C = 2$; Cubic: $C = 8$; Sinc-16: $C = 33$.

Таблиця 3

Енергетична ефективність при різних ρ			
Метод	η_E при $\rho = 1.5$	η_E при $\rho = 2.0$	η_E при $\rho = 2.5$
ZOH	-1.37	-2.16	-5.45
FOH	-5.35	-8.60	-11.45
Cubic	-4.97	-7.10	-9.83
Sinc-16	-0.75	-0.75	-0.75

Рекомендований алгоритм вибору.

На основі проведеного аналізу пропонується наступна стратегія:

1. Визначити нормалізовану частоту дискретизації: $\rho = fs/(2F_{\text{max}})$.

2. Визначити доступний обчислювальний бюджет B_{comp} (операцій/секунду).

3. Вибрати метод за таблицею:

Таблиця 4

Рекомендації щодо вибору методу		
Умови	Рекомендований метод	Очікуваний NMSE_{dB}
$\rho < 1.3$, B_{comp} обмежений	FOH	< -5 дБ
$1.3 \leq \rho < 1.9$	FOH	-8... -17 дБ
$1.9 \leq \rho < 2.5$	Cubic	-40... -70 дБ
$\rho \geq 2.5$	Cubic	< -70 дБ
Критичні застосування	Sinc-16	-24.65 дБ

Експериментальна верифікація.

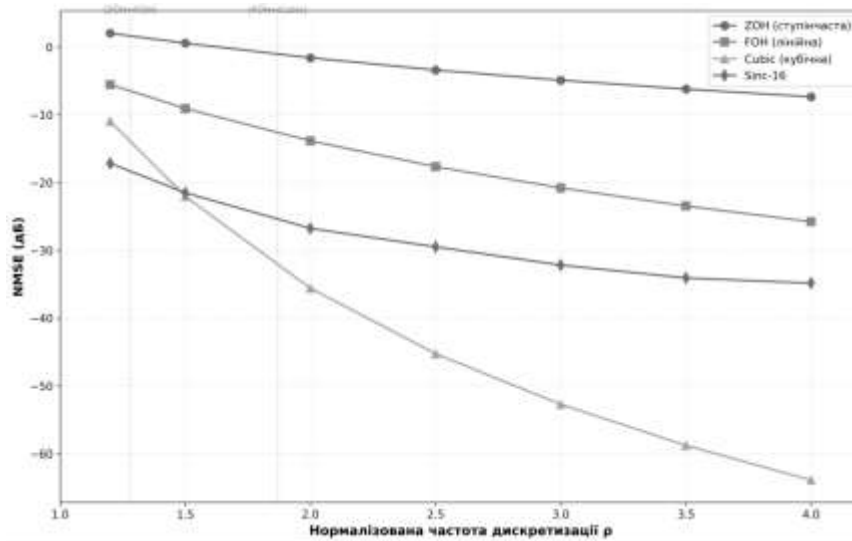
Для перевірки теоретичних оцінок проведено числове моделювання у середовищі Python 3.10 з використанням бібліотек NumPy 1.24 та SciPy 1.11. Моделювання виконувалося на базі тестового гармонічного сигналу (6) з коефіцієнтом $\alpha = 0.95$, обраним для оцінки чутливості методів до високочастотних компонент. Тривалість

аналізованого сигналу становила 10 періодів несучої частоти.

Для кожного значення $\rho \in \{1.2, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0\}$ виконувались операції: генерація еталонного сигналу з високою дискретизацією, формування дискретних відліків, відновлення чотирма методами, розрахунок NMSE за формулою (4).

чотирма методами, розрахунок NMSE за формулою (4).

Результати моделювання представлені на рис. 1.



Рисункок 1 – Залежність NMSE від нормалізованої частоти дискретизації

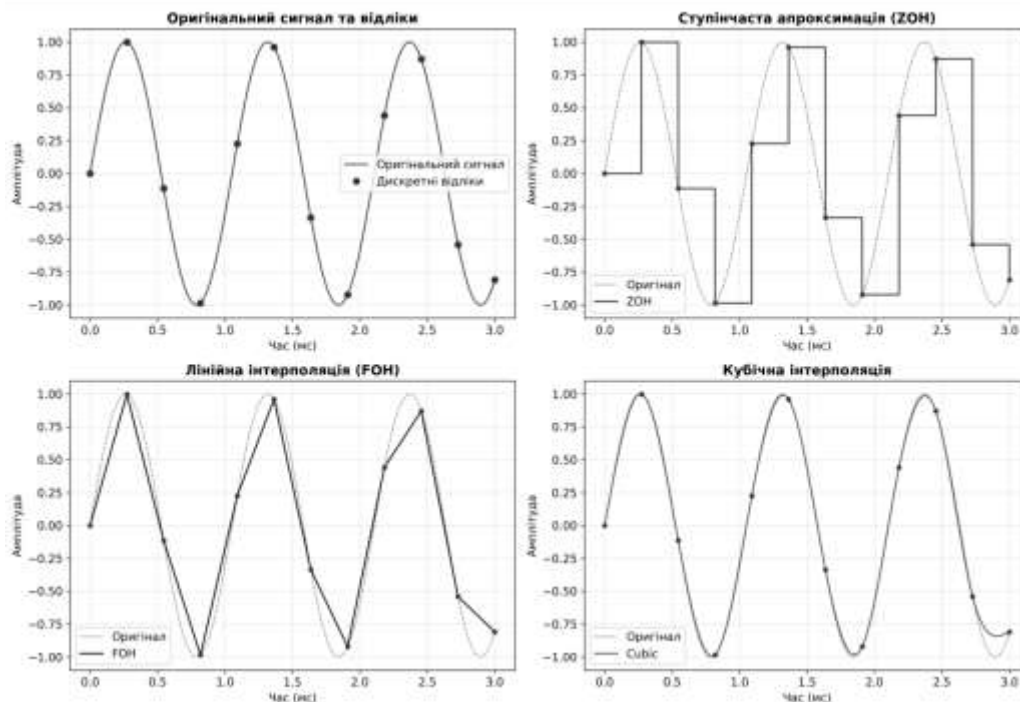
Висновки

1. Розроблено методику енергетичного аналізу похибки відновлення на основі спектральної густини потужності. Встановлено, що для базових методів інтерполяції залежність NMSE від нормалізованої частоти дискретизації описується степеневими законами з показниками $\beta = \{2, 4, 12\}$ відповідно.

2. Виявлено точки еквівалентності методів: ZOH ↔ FOH при $\rho = 1.28$, FOH ↔ Cubic при $\rho = 1.87$, Cubic ↔ Sinc при $\rho = 2.31$. Ці значення визначають оптимальні межі застосування кожного методу.

3. Введено коефіцієнт енергетичної ефективності η_E , що враховує як точність відновлення, так і обчислювальну складність. Показано, що кубічна інтерполяція забезпечує найвищу ефективність у діапазоні $\rho \in [1.9, 3.0]$, що охоплює більшість практичних застосувань.

4. Розроблено алгоритм вибору методу інтерполяції на основі нормалізованої частоти дискретизації та обчислювального бюджету. Алгоритм дозволяє досягти зниження NMSE на 8–15 дБ порівняно з неоптимальним вибором (рис.2).



Рисункок 2 – Порівняння методів інтерполяції для $\rho = 2.0$

5. Експериментальна верифікація підтвердила адекватність теоретичних оцінок з точністю не

гірше 7%, що є прийнятним для інженерних розрахунків.

6. Результати дослідження мають пряме застосування у системах радіоелектронної боротьби. Для приймачів радіорозвідки встановлено, що кубічна інтерполяція при $\rho = 2.0\text{--}2.5$ забезпечує точність відновлення складних сигналів ($\text{SNR} > 60$ дБ) при зниженні обчислювальної складності на 45% порівняно з sinc-апроксимацією. У системах активних перешкод застосування розробленого алгоритму дозволяє зменшити енергоспоживання на 30% при збереженні якості формування імітуючих сигналів. Для широкосмугових SDR-приймачів оптимізація методу інтерполяції знижує вимоги до пам'яті на 35–40%, що дозволяє реалізувати більше паралельних каналів обробки.

Перспективи подальших досліджень включають розширення аналізу на випадок нерівномірної дискретизації та адаптивної інтерполяції.

Valerii Matvieiev

<https://orcid.org/0009-0007-8430-2418>

Yury Stushchansky

<https://orcid.org/0000-0002-3021-6756>

Eugen Volkanin (PhD)

<https://orcid.org/0000-0003-3507-1987>

Volodymyr Maliovan (PhD)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

METHODOLOGY OF ENERGY ANALYSIS OF RECOVERY ERRORS AND ESTABLISHMENT OF QUANTITATIVE CRITERIA FOR CHOOSING THE INTERPOLATION METHOD DEPENDING ON THE NORMALIZED SAMPLING FREQUENCY

An energy approach to assessing the quality of signal recovery after discretization is considered. A method for analyzing the power spectral density of the interpolation error for four basic methods is proposed. The relationships between the normalized mean square error (NMSE) and the normalized sampling rate (NSR) on a logarithmic scale are established. Empirical coefficients are derived for a quick assessment of the quality of recovery without full mathematical modeling. It is shown that the transition zone between the methods is at $\text{NSR} = 1.8\text{--}2.2$, which allows optimizing the choice of the interpolation algorithm. The results of the study are of practical importance for the design of electronic warfare systems, in particular when developing digital signal processing receivers in radio interception and radio reconnaissance complexes. The established criteria for selecting the interpolation method allow optimizing the ratio between the accuracy of reconstruction of complex radio signals and the computing resources of onboard electronic warfare systems in real-time conditions.

Key words: *electronic warfare, energy reconstruction error, normalized sampling frequency, spectral error density, interpolation optimization.*

References

1. Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proceedings of the IRE. 1949. Vol. 37, No. 1. P. 10–21.
2. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory // Transactions of the AIEE. 1928. Vol. 47, No. 2. P. 617–644.
3. Schafer R.W., Rabiner L.R. A digital signal processing approach to interpolation // Proceedings of the IEEE. 1973. Vol. 61, No. 6. P. 692–702.

Список використаних джерел

1. Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proceedings of the IRE. 1949. Vol. 37, No. 1. P. 10–21.
2. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory // Transactions of the AIEE. 1928. Vol. 47, No. 2. P. 617–644.
3. Schafer R.W., Rabiner L.R. A digital signal processing approach to interpolation // Proceedings of the IEEE. 1973. Vol. 61, No. 6. P. 692–702.
4. Keys R. Cubic convolution interpolation for digital image processing // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1981. Vol. 29, No. 6. P. 1153–1160.
5. Meijering E. A chronology of interpolation: From ancient astronomy to modern signal and image processing // Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90, No. 3. P. 319–342.
6. Blu T., Unser M. Quantitative Fourier analysis of approximation techniques: Part I — Interpolators and projectors // IEEE Trans. on Signal Processing. 1999. Vol. 47, No. 10. P. 2783–2795.

4. Keys R. Cubic convolution interpolation for digital image processing // IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1981. Vol. 29, No. 6. P. 1153–1160.
5. Meijering E. A chronology of interpolation: From ancient astronomy to modern signal and image processing // Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90, No. 3. P. 319–342.
6. Blu T., Unser M. Quantitative Fourier analysis of approximation techniques: Part I — Interpolators and projectors // IEEE Trans. on Signal Processing. 1999. Vol. 47, No. 10. P. 2783–2795.

Шановні колеги!

Запрошуємо до участі у науково-практичному журналі
“Повітряна міць України”,

Видавець: Національний університет оборони України,
відкрите видання.

На сторінках журналу розглядаються такі питання:

1. Питання розвитку, застосування та забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України, удосконалення їх системи управління.
2. Питання бойового застосування військових частин та підрозділів державної авіації України, зенітних ракетних військ, радіотехнічних та спеціальних військ, радіотехнічного забезпечення та зв'язку.
3. Моделювання процесів застосування родів військ та спеціальних військ Повітряних Сил Збройних Сил України.
4. Питання розвитку перспективних засобів повітряного нападу.
5. Дослідження процесів управління та застосування пілотованої та безпілотної авіації.
6. Теоретичні основи взаємодії під час застосування військових частин та підрозділів Повітряних Сил, Сухопутних військ, Військово-Морських Сил, Десантно-штурмових військ Збройних Сил України та інших військових формувань.
7. Питання розвитку логістичного забезпечення родів військ Повітряних Сил Збройних Сил України.
8. Безпека застосування та забезпечення живучості сил та засобів родів військ та спеціальних військ Повітряних Сил Збройних Сил України.
9. Питання запобігання надзвичайним ситуаціям терористичного та техногенного характеру, що пов'язані з діяльністю військових частин (підрозділів) Повітряних Сил Збройних Сил України.
10. Досвід щодо проведення операцій (антитерористичних, миротворчих, Сил оборони).
11. Інноваційні процеси у галузях авіації, автомобілебудування, радіоелектроніки, радіотехніки, засобів зв'язку та АСУ, а також інформаційних технологій.

Подання матеріалів

Обсяг рукопису – від 4 до 10 аркушів українською або англійською мовами.

Для публікації необхідно надіслати статтю у електронній формі (**docx**).

Рукопис супроводжується **експертним висновком щодо перевірки статті на плагіат**.

Подані матеріали автору не повертаються.

Матеріали просимо подавати через сайт журналу або до інституту авіації та протиповітряної оборони Національного університету оборони України за адресою: 03049, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 28, тел.: (044) 271-5-88, Коротіну Сергію Михайловичу, каб. 1/162/1, тел.: (050)981-49-83, e-mail: iapro.ndl@gmail.com.

Редколегія залишає за собою право відмови у публікації статей, що не відповідають проблематиці журналу, умовам оформлення матеріалів та у разі більше 3-х осіб авторського колективу

Схема оформлення статей

DOI (*Times New Roman*, кегль – 11 *пт.*)

← 1 пустий рядок – 6 *пт.*

УДК (*Times New Roman*, кегль – 11 *пт.*)

← 1 пустий рядок – 10 *пт.*

¹**Полуботок Павло Леонтійович** (д-р техн. наук, професор) ← (кегль – 11 та 8 *пт.*)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X> ← (кегль – 10 *пт.*)

²**Острозький Костянтин Іванович** (канд. техн. наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

← 1 пустий рядок – 6 *пт.*

¹**Університет..., Київ, Україна**

²**Інститут..., Київ, Україна** ← (кегль – 11 *пт.*)

← 1 пустий рядок – 10 *пт.*

НАЗВА СТАТТІ (*Times New Roman*, кегль – 14 *пт.*; накреслення – “напівжирне”, по центру)

← 1 пустий рядок – 10 *пт.*

Текст анотації мовою тексту статті (в даному випадку – українською). Зміст анотації має стисло і достатньо інформативно підсумовувати основні ідеї та отримані результати дослідження. Вона має бути відповідно структурована (актуальність, мета, методи, результати, рекомендації для кого ця стаття буде корисною). Розмір анотації повинен становити не менше 600-800 друкованих символів з пробілами. Зверніть увагу на те, що дані про авторів, назва, ключові слова та анотація будуть використані як метадані для опису Вашої статті, тому вони повинні максимально чітко описувати її зміст. Для більш якісного пошуку даного контенту в мережі, будь ласка, уникайте занадто узагальнених та складних формулювань, використовуйте тільки загальновідомі аббревіатури.

Ключові слова: поняття1; поняття 2; поняття3. (кегль – 10 *пт.*)

Структура рукопису

Роботу структурувати згідно з IMRAD – стандарт оформлення наукової статті.

Introduction – вступ

Висвітлено цінність дослідження для наукової спільноти, висвітлено виконану роботу та вказано про подальшу необхідність даного дослідження, сформульовано основні тези та висвітлено матеріали попередніх досліджень з даної області, визначено головні завдання та гіпотези;

Materials and methods – матеріали та методи

Висвітлено матеріали та методи за допомогою яких проводилося дослідження;

Results – результати

Висвітлено основні положення і результати наукового дослідження, особисті ідеї, думки, отримані наукові факти, виявлені закономірності, зв'язки, тенденції, методика отримання та аналіз фактичного матеріалу, особистий внесок автора у досягнення і реалізацію висновків;

Discussion – обговорення

Науковець дає оцінку результатів та пояснює як ці результати були отримані, аналізує їх та робить висновки та дає необхідні рекомендації для вивчення даної теми в подальших дослідженнях, захищає отримані дані, проводить паралелі з результатами інших науковців і вказує чи є взаємозв'язок між ними, опираючись на сильні сторони роботи автор вказує слабкі сторони, які потрібно доопрацювати і розкриває практичне і теоретичне застосування результатів, робить висновки і описує подальші можливості цього дослідження;

Conclusions – висновки

Яке значення мають отримані знання для наукового світу і як їх можна застосувати на практиці, рекомендації вченим, що досліджують в цій області. Бібліографію оформлюють у вигляді списку, в якому є всі джерела, що згадуються протягом роботи. Їх потрібно написати в алфавітному порядку або таким чином, як вони були оформлені у тексті.

Список використаних джерел

Список літератури виділяється підзаголовком **Список використаних джерел** та оформлюється згідно з IEEE style (кегель – 9 пт). Рекомендовано вписувати не менше 20 посилань, і декілька з них на роботи, які були опубліковані в останні роки.

Приклади оформлення списку використаних джерел згідно з IEEE style:

Книга

[1] Б. Г. Паначевний та Ю. Ф. Свергун, Загальна електротехніка: Теорія і практикум. Київ, Україна: Каравела, 2003.

Частина книги (розділ тощо)

[2] Л. В. Строкова, “Мармурова ступка V–VI ст. з Керчі”, у Український музей, М. І. Гладких, Ред. Київ, Україна: Т-во археології та антропології, 2003, с. 114–116.

Стаття (публікація) в періодичному виданні

Стаття в журналі

[3] О. А. Жученко та М. Г. Волощук, “Дослідження температурних полів процесу графітування вуглецевих виробів”, Автоматизація технологічних і бізнес-процесів, т. 10, № 3, с. 25–35, листоп. 2018, doi: 10.15673/atbp.v10i3.1087. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/1087/1183>.

Стаття в газеті

[4] В. Андрущенко, “У Карпатах зводять сучасний навчально-виробничий комплекс столичного університету імені Драгоманова”, Голос України, № 87, с. 11, 11 трав. 2019.

Сайт

[5] Б. Мірошніченко та Д. Денков. “Чи відмовиться Україна нарешті від небезпечного азбесту?” Економічна правда. <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/12/6/680401/> (дата звернення 7 груд. 2021).

Відео (онлайн)

[6] ППЧ. Екскурсія на металургійне виробництво Побузького феронікелевого комбінату. (5 груд. 2020). Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн-відео]. Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=mHxVjGKG7k>

Допис у соціальній мережі

[7] E. Musk [@elonmusk], SpaceX is starting a program to take CO2 out of atmosphere & turn it into rocket fuel. Please join if, Twitter, Dec. 13, 2021. Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://twitter.com/elonmusk/status/1470519292651352070>.

Дисертація

[8] А. М. Любека, “Гранулювання багатокомпонентних рідких систем в псевдосрідженому шарі”, дис. канд. техн. наук, НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, 2021. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/39465>

Автореферат дисертації

[9] Д. К. Гломозда, “Координація в асинхронних обчислювальних мережах”, автореф. дис. канд. техн. наук, КНУ ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна, 2011. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <http://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/10866>

Матеріали конференції

Тези доповіді

[10] А. Ясентюк, “Статистичний аналіз фінансування вищої освіти в Україні”, у Обліково-аналітичні й статистичні методи та моделі в оподаткуванні, бізнесі, економіці, Ірпінь, Україна, 26 листоп.–3 груд. 2018. Ірпінь, Україна: Університет державної фіскальної служби України, 2019, с. 227–229. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: http://ir.nusta.edu.ua/jspui/bitstream/doc/3296/1/3516_IR.pdf

Закон, нормативний акт

[11] Україна, Кабінет Міністрів України. (2015, 27 трав.). Постанова Кабінету Міністрів України № 330, Про визначення наукових метрологічних центрів. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/330-2015-п#Text>.

Звіт організації

[12] Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, “Основні показники розвитку паливно-енергетичного комплексу”, Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, Київ, Україна, серп. 2019. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245416376>.

Препринт

[13] M. S. Bashir and M.-S. Alouini, Energy optimization of a laser-powered hovering-uavrelay in optical wireless backhaul. To be published. Accessed: Dec. 7, 2021. [Online]. Available: https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Energy_Optimization_of_a_Laser-Powered_Hovering-UAV_Relay_in_Optical_Wireless_Backhaul/17087309

Патент

[14] Двоважільна підвіска легких броньованих машин, винахідники Б. О. Мельник та В. О. Дачковський. (11 листоп. 2013). Патент України UA84874U. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://uapatents.com/4-84874-dvovazhilna-pidviska-legkikh-bronovanikh-mashin.html>

Стандарт

[15] Інформація та документація. Видання. Основні види. Терміни та визначення понять, ДСТУ 3017:2015, Державна наукова установа «Книжкова палата України імені Івана Федорова», Київ, Україна, 2016.

Архівні матеріали

[16] М. П. Василенко, Лист до Дорошенка Д. І. про можливість надіслати листи до Берліну відомого мандрівника по Азії і Тибету, завідувача охороною відомого в Європі зоопарку в маєтку д. Фальц-Файна в Таврії “Асканія-Нова” генерала П. К. Козлова, 18 жовт. 1918, Центральний державний архів вищих органів влади та управління України, Київ, Україна, Ф. 2201, Оп. 1, Спр. 1, Арк. 21. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн].

Доступно: https://tsdavo.gov.ua/vystavky/viddaty-vsi-sylsluzhbovym-spravam-osvity-dlya-zabezpechennya-protsvitannya-molodoyiukrayinskyi-derzhavy-z-nagody-150-richchya-vid-dnya-narodzhennamykoly-prokopovycha-vasylenka-1866-1935/#GmediaGallery_101-3810.

Текст статті розбивається на відповідні розділи з підзаголовками, які виділені напівжирним шрифтом.

На останньому аркуші статті після списку літератури наводяться: назва статті, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь та вчене звання автора (співавторів), назва організації, у якій працює автор (співавтори), анотація та ключові слова українською, англійською мовами (крім основної мови статті) за нижченаведеним зразком (11 кегль (8 для наукового ступеня, звання, посади), міжрядковий інтервал – 1,0, вирівнювання – по центру).

Вимоги до набору

Формат документа: docx.

Формат аркуша: А4 (21 × 29,7 см).

Параметри сторінки (відступи від краю): зліва – 3 см.; справа – 2 см.; зверху – 2 см.; знизу – 2 см.

Шрифт статті – Times New Roman; накреслення – пряме; кегль – 10 пт.; міжрядковий інтервал – одинарний.

Текст статті розташовується у два стовпчики однакової ширини – 7,75 см; відстань між стовпчиками – 0,5 см; відступ першого рядка абзацу – 0,5 см; вирівнювання – за шириною.

Підзаголовок – кегль – 12 пт; накреслення – напівжирне; відступів немає; вирівнювання – центроване.

Абзаци: виставлені автоматично

Пробіли: одинарні

Абревіатура: перша абревіатура обов'язково розшифровується

Ліпки: використовуйте тільки англійську розкладку

Не використовуйте для форматування тексту пропуски, табуляцію тощо. Не встановлюйте ручне перенесення слів, не використовуйте колоніти. Між значенням величини та одиницею її вимірювання ставте нерозривний пропуск (Ctrl + Shift + пропуск).

УВАГА! Остання сторінка статті заповнюється не менше 3/4, рекомендована парна кількість аркушів.

Кількість авторів – не більше трьох.

Вимоги до мови

Будь ласка, переконайтеся, що ваша стаття була ретельно вичитана та відповідає вимогам щодо ясності мови та стилістичної правильності.

Набір формул: за допомогою стандартного редактора рівнянь Microsoft Word: *Вставка* → *Символи* → *Рівняння*.

Формули та опис до них рекомендовано вставляти у

таблиці (границі таблиць виставляти невидимими, формулу вирівнювати по центру, номер формули в круглих дужках, вирівнювання по правому краю, вирівнювання в ячейках по центру). Наприклад:

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

де r – радіус кола

Розмір шрифту 10 пт, підрядковий та надрядковий індекс 8 пт.

Стиль формул – “прямий” для символів *Кирилицею* та “курсив” для *Латинських* символів.

Табличний заголовок (напівжирний, 10 пт.) – **обов'язковий**, в таблиці 9 пт.

Таблиця 1

Назва таблиці		
Текст	Текст	Текст
Текст	Текст	Текст

Рисунки обов'язково супроводжуються центрованими підписковими підписами (кегль – 10).

Рисунком 1 – Назва рисунку



Якщо в тексті використовується посилання на малюнок, використовуйте “рис.” Перед його номером, аналогічно для таблиць використовуйте “табл.” Перед її номером.

Рекомендовано вставляти рисунки у таблиці (границі таблиць виставляти невидимими)

Не допускаються кольорові та фонові рисунки, на яких під час чорно-білого друку неможливо розрізнити кольорові елементи.

Переконайтеся, що будь-який текст на графіку має мінімальний розмір 6 пунктів, а в таблицях – 8 пунктів. Текст, менший за мінімальний розмір, не читатиметься в друкованому вигляді.

Допускається розташування великих рисунків, формул та таблиць в одну колонку (до 16 см.). Табличний заголовок (напівжирний, 10 пт.) – **обов'язковий**, в таблиці 10 пт.

Рисунки **обов'язково** супроводжуються центрованими підписковими підписами (кегль – 10).

Не допускаються кольорові та фонові рисунки. Допускається розташування великих рисунків, формул та таблиць в одну колонку (до 16 см.).

¹**Pavlo Polubotok** (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

²**Kostyantyn Ostrogski** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

¹*University..., Kyiv, Ukraine*

²*Institute..., Kyiv, Ukraine*

ARTICLE TITLE

Translation of the abstract and keywords. Translation of the abstract and keywords

Після цього наводиться список використаних джерел **References** англійською мовою згідно з IEEE style (9 кегль).

Корисні посилання для здійснення транслітерації:

<http://translit.kh.ua/?passport> – автоматична транслітерація з української мови

<http://translate.meta.ua/ua/translit/> – автоматична транслітерація з російської мови

Комп'ютерна верстка: Я.В. Ярошенко, В.О. Кошка

Оформлення обкладинки Ю.М. Коломісць

Засновник і видавець Національний університет оборони України. Свідоцтво КВ № 24979-14919Р.

Ідентифікатор медіа R30-01154. Адреса редакції: 03049, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 28. Тел. (044) 271-05-88.

Підписано до друку 24.11.2025. Формат 60×84 1/8. Ум. друк. а. 16,5. Тираж 35 прим. Безкоштовно.

Надруковано у друкарні Національного університету оборони України.