

# ПОВІТРЯНА МІЦЬ УКРАЇНИ

№ 1 (10)  
2026

## 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: iappo.ndl@gmail.com  
електронна версія журналу:  
sap.niuou.org.ua

Журнал зареєстровано в  
Міністерстві юстиції України  
(Свідоцтво  
КВ № 24979-14919Р)  
ідентифікатор медіа  
у Реєстрі 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 від 11.06.2026 № 928  
"Про включення наукових  
періодичних видань до  
Переліку наукових фахових  
видань України")

Галузі науки: технічні,  
військові.  
Тематична спрямованість  
науково-практичного журналу  
відповідає таким  
спеціальностям:  
К5 Військове управління (за  
видами збройних сил);  
К7 озброєння та військова  
техніка;  
К10 Цивільна безпека.

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

Рекомендовано до друку  
вченою радою інституту  
авіації та протиповітряної  
оборони Національного  
університету оборони України  
(протокол № 11 від  
10 квітня 2026 року)  
При використанні матеріалів  
поширення на журнал  
"Повітряна міць України"  
обов'язкове

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

<b>РОЗВИТОК ТА ОПЕРАТИВНЕ МІСТЕЦТВО ПОВІТРЯНИХ СИЛ</b> .....	5
Генезис та еволюція концепції A2/AD: від детермінованих систем ППО до мережецентричного протистояння ( <i>Габідулін І.А.</i> ).....	5
Мультидомenna концепція ударних дій повітряної компоненти ( <i>Блискун О.Є., Авраменко О.В., Ярошенко А.С., Мартинюк О.Р.</i> ).....	20
Удосконалена методика оцінювання ефективності функціонування системи розвідки повітряного противника в наступальній операції ( <i>Поліщук С.В., Веровок М.В.</i> ).....	28
Удосконалена методика розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття ( <i>Печененко О.М.</i> ).....	35
Рекомендації щодо підвищення ступеня реалізації бойових можливостей угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу ( <i>Грицько Є.О., Глоба О.В.</i> ).....	42
<b>БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОДІВ ВІЙСЬК (СИЛ) ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ</b> .....	52
Еволюція тактики застосування зенітних ракетних військ як фактор трансформації системи протиповітряної та протиракетної оборони України у Війні за незалежність ( <i>Кривоножко А.М., Резнік Д.В., Паталаха В.Г., Горобець Ю.О.</i> ).....	52
Аналіз факторів, які впливають на ефективність застосування ударних безпілотної систем під час ведення протиповітряної оборони України ( <i>Степанов Г.С., Орхівський П.В., Наконечний М.М., Яцевич А.В.</i> ).....	63
<b>МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЙ ТА БОЙОВИХ ДІЙ У ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРИ</b> .....	72
Дослідження характеристик радіолокаційної помітності засобів повітряного нападу рф із застосуванням технологій 3D-моделювання (англійською мовою) ( <i>Завадський Д.С., Білбородов О.О.</i> ).....	72
<b>РОЗВИТОК ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ТА СПОСОБІВ ПРОТИДІЙ ІМ</b> .....	82
Дослідження ефективної площі розсіювання лізв лонеберга, встановлених на БПЛА типу "Пародія" ( <i>Кучин А.В., Солоненко Ю.В., Кошка В.О., Лук'яненко С.А.</i> ).....	82
Метод оцінювання функції керування під час коригування траєкторії безпілотної літального апарата з використанням обчислювальної математики ( <i>Миронюк М.Ю., Салій А.Г., Барабаш О.В., Макаруч А.В.</i> ).....	92
Попереднє компонування зовнішнього вигляду легкого дозвукового безпілотної літального апарата з реактивною силовою установкою ( <i>Брега Д.А., Бахін В.М., Шабанов П.П., Гумений А.М.</i> ).....	97
<b>РОЗВИТОК ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОТОВАНОЇ ТА БЕЗПІЛотної АВІАЦІЇ</b> .....	107
Критеріальний аналіз та вибір еволюційних моделей самоорганізації природних систем для моделювання роєвого застосування безпілотної літальних апаратів у задачах розвідки та ураження об'єктів противника ( <i>Шовкошитний І.І., Василенко О.А.</i> ).....	107
Методологія визначення бойових потенціалів різномісних БПЛА під час виконання різномісних бойових завдань ( <i>Горбенко В.М., Ікаєв Д.Р., Кіресенко В.В., Дзюбенко Ю.А.</i> ).....	117
<b>ЛОГІСТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПІДТРИМКА ДІЙ ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ</b> .....	121
Методика оцінювання ефективності ремонту озброєння та військової техніки протиповітряної оборони в ході ведення бойових дій ( <i>Ков'ях І.В., Дранник П.А., Білявський Б.А.</i> ).....	121
Методика оптимального розподілу ремонтного фонду засобів наземного забезпечення польотів авіації сил оборони до ремонтних військових частин ( <i>Смиченко Є.О.</i> ).....	131
<b>ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СТРУКТУР ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ</b> .....	140
Методика натурної верифікації методу визначення площі осередку надзвичайної ситуації природного характеру за даними аерофотознімання з БПЛА DJI MAVIC 3 ( <i>Бас О.В., Мирошник О.М., Федоров О.В., Харченко С.О.</i> ).....	140
<b>ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВАГИ В ПОВІТРІ</b> .....	147
Визначення технічних вимог до безпілотної літального апарата для евакуації поранених з поля бою ( <i>Луцевят О.І., Ярошенко Я.В., Ткаченко А.В., Садовий К.В.</i> ).....	147
Метод перманентного аналізу воєнних ігор на основі адаптивного життєвого циклу та динамічних патернів ( <i>Базіло С.М., Міхін О.О., Куцак С.В., Ванічній В.А.</i> ).....	155
Міцність конструкцій повітряних суден як основа їхньої безпечної експлуатації ( <i>Царенко А.О., Самохліб О.О., Тяній В.Г., Олійник Л.Л.</i> ).....	162
Проектування та виробництво безпілотної літальних апаратів через інноваційні технології та інженерні рішення ( <i>Головєнський В.В., Мальований В.В., Васін І.І., Пузир М.С.</i> ).....	174
Моделювання поведінки функції інтенсивності відмов агрегатів авіаційної техніки механічного типу з використанням дифузійно-монотонного закону розподілу випадкових величин ( <i>Сафонов І.Є., Коровін І.П.</i> ).....	185
Удосконалена сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення з використанням технологій mesh-мереж ( <i>Білоус О.В.</i> ).....	195
<b>РОЗВИТОК ФОРМ І МЕТОДІВ ПІДГОТОВКИ РОДІВ ВІЙСЬК (СИЛ) ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ</b> .....	205
Аналіз діяльності коаліції авіаційних спроможностей та інтегрованої протиповітряної та протиракетної оборони в рамках міжнародного військового співробітництва під час відсічі збройної агресії ( <i>Дерікат О.Ю., Хлипавка О.В., Поліщук В.В.</i> ).....	205
<b>Вимоги до оформлення наукових статей</b> .....	212

# Редакційна колегія

## Головний редактор

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

## Члени редколегії:

**АВРАМЕНКО** *Олександр Васильович*

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

**КУРТСЕЇТОВ** *Тимур Ленурович*

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

**ЩИПАНСЬКИЙ** *Павло Володимирович*

кандидат військових наук, професор  
ORCID: [0000-0002-0854-733X](https://orcid.org/0000-0002-0854-733X)

**ОПЕНЬКО** *Павло Вікторович*

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

**БАЗІЛО** *Сергій Михайлович*

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

**ЗЕМЛЯНСЬКИЙ** *Олег Миколайович*

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

**ЛОБОЙЧЕНКО** *Валентина Михайлівна*

доктор технічних наук, професор  
ORCID: [0000-0001-5188-6479](https://orcid.org/0000-0001-5188-6479)

**БАРАБАШ** *Олег Володимирович*

доктор технічних наук, професор  
ORCID: [0000-0003-1715-0761](https://orcid.org/0000-0003-1715-0761)

**ОЛЕКСЕНКО** *Олександр Олександрович*

доктор філософії  
ORCID: [0000-0002-6853-9630](https://orcid.org/0000-0002-6853-9630)

**БЕРНАТ** *Павел*

доктор філософії  
ORCID: [0000-0002-8150-9794](https://orcid.org/0000-0002-8150-9794)

**ГЕРАСИМЕНКО** *Володимир Вікторович*

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

**МУРАСОВ** *Рустам Камілович*

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

**КОРОТІН** *Сергій Михайлович*

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

**МИРОНЮК** *Микола Юрійович*

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

**КОЛОМІЄЦЬ** *Юрій Миколайович*

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

**ГАВРИЛКО** *Євген Володимирович*

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

**КРАВЧЕНКО** *Юрій Васильович*

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

**РАДЗІВІЛОВ** *Григорій Данилович*

кандидат технічних наук, професор  
ORCID: [0000-0002-6047-1897](https://orcid.org/0000-0002-6047-1897)

**СТЕШЕНКО** *Петро Миколайович*

кандидат технічних наук, старший дослідник  
ORCID: [0000-0003-1432-6864](https://orcid.org/0000-0003-1432-6864)

**ВІНТР** *Зденек*

доктор філософії, професор  
ORCID: [0000-0003-3128-0802](https://orcid.org/0000-0003-3128-0802)

**СВИНЧУК** *Ольга Василівна*

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
ORCID: [0000-0001-9032-6335](https://orcid.org/0000-0001-9032-6335)

## Технічні редактори

**МАЙСТРОВ** *Олексій Олексійович*

кандидат технічних наук, доцент

**ЯРОШЕНКО** *Ярослав Віталійович*

доктор філософії

# AIR POWER OF UKRAINE

№ 1 (10)  
2026

## 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](http://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 of 11.06.2026 No. 928  
"On the inclusion of scientific  
periodicals in the List of  
scientific professional  
publications of Ukraine")

**Branches of science:** technical,  
military.  
The thematic orientation of the  
scientific and practical journal  
corresponds to the following  
specialties:  
**K5** Military administration (by  
types of armed forces);  
**K7** Armament and military  
equipment;  
**K10** Civil security.

The journal is published in  
Ukrainian and English  
twice a year

Recommended for publication  
by the Scientific Council  
of the Aviation and Air Defence  
Institute of the National Defence  
University of Ukraine  
(protocol № 114 from  
April, 10, 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

<b>AIR FORCE DEVELOPMENT AND OPERATIONAL ART</b> .....	5
Genesis and Evolution of A2/AD Concepts: From Deterministic Systems To Network-Centric Warfare ( <i>I. Gabidulin</i> ) .....	5
Multi-Domain Strike Concept for the Air Component ( <i>O. Blyskun, O. Avramenko, A. Yaroshenko, O. Martyniuk</i> ) .....	20
Improved Methodology for Evaluating the Operational Effectiveness of the Aerial Threat Reconnaissance System in an Offensive Operation ( <i>S. Polishchuk, M. Verovok</i> ) .....	28
Enhanced Methodology for Distribution of Air Targets Between Manned and Unmanned Aviation During Air Cover Missions ( <i>O. Pechenko</i> ) .....	35
Recommendations for Enhancing the Realization of Combat Capabilities of Mixed Surface-to-Air Missile Group of Troops ( <i>Y. Hrynko, O. Hloba</i> ) .....	42
<b>COMBAT APPLICATION OF ARMS AND SERVICES OF THE AIR COMPONENT</b> .....	52
Evolution of Tactics of The Application of Anti-Air Missiles as a Factor in the Transformation of the Air And Missile Defense System of Ukraine in the War for Independence ( <i>A. Kryvonozhko, D. Rieznik, V. Patalakha, Y. Horobets</i> ) .....	52
Analysis of Factors Influencing the Effectiveness of Employing Strike Unmanned Systems in the Course of Ukraine's Air Defense Operations ( <i>H. Stepanov, P. Orikhovskiy, M. Nakonechniy, A. Yansevych</i> ) .....	63
<b>MODELING AND SIMULATION OF AIR OPERATIONS AND COMBAT ACTIONS</b> .....	72
Research on the Characteristics of Radar Detectability of Russian Air Attack Weapons Using 3D Modelling Technologies ( <i>D. Zavadsky, O. Biloborodov</i> ) .....	72
<b>DEVELOPMENT OF AERIAL ASSAULT ASSETS AND COUNTER-AIR MEASURES</b> .....	82
Investigation of the Radar Cross Section of Luneburg Lenses Installed on the Parodiya-Type UAV ( <i>A. Kupchyn, Y. Soloshenko, V. Koshka, S. Lukianenko</i> ) .....	82
Evaluation of the Control Function for UAV Trajectory Correction Using Computational Mathematics ( <i>M. Myroniuk, A. Sali, O. Barabash, A. Makarchuk</i> ) .....	92
Preliminary Layouting of a Light Subsonic Unmanned Aerial Vehicle With a Jet Propulsion System ( <i>D. Brega, V. Bakhin, P. Shabanov, A. Humenyi</i> ) .....	97
<b>DEVELOPMENT OF MANNED AND UNMANNED AVIATION EMPLOYMENT</b> .....	107
Criteria-Based Analysis and Selection of Evolutionary Models of Self-Organization in Natural Systems for Modeling the Swarm Application of Unmanned Aerial Vehicles in the Tasks of Intelligence and Attacking Enemy Objects ( <i>I. Shovkoshytniy, O. Vasylenko</i> ) .....	107
Methodology for Determining the Combat Potential of Different Types of UAVs When Performing Various Combat Tasks ( <i>V. Horbenko, D. Ikaiev, V. Kireienko, Y. Dziubenko</i> ) .....	107
<b>LOGISTICS AND OPERATIONAL SUPPORT FOR THE AIR COMPONENT</b> .....	121
Methodology for Assessing the Effectiveness of Repair of Weapons and Military Equipment of Air Defense During Combat Operations ( <i>I. Koviakh, P. Drannyk, B. Bilyavsky</i> ) .....	121
Methodology for Optimal Distribution of the Repair Fund of Ground Equipment of Aircraft Support of the Defence Forces to Military Repair Units ( <i>Y. Smychenko</i> ) .....	131
<b>PREVENTION OF TERRORIST AND TECHNOGENIC EMERGENCIES RELATED TO THE ACTIVITIES OF AIR COMPONENT ORGANIZATIONAL STRUCTURES</b> .....	140
Methodology for Field Verification of the Method for Determining the Area of a Natural Emergency Focus Based on Aerial Imagery from a DJI MAVIC 3 UAV ( <i>O. Bas, O. Myroshnyk, O. Fedorov, S. Kharchenko</i> ) .....	140
<b>AIR SUPERIORITY TECHNOLOGIES</b> .....	147
Defining Technical Requirements for an Unmanned Aerial Vehicle for Casualty Evacuation from the Battlefield ( <i>O. Lutseviat, Y. Yaroshenko, A. Tkachenko, K. Sadovyi</i> ) .....	147
A Method for Permanent Wargame Analysis Based on an Adaptive Life Cycle and Dynamic Patterns ( <i>S. Bazilo, O. Mikhin, S. Kutsak, V. Vapnichnyi</i> ) .....	155
Strength of Aircraft Structures as the Basis for Their Safe Operation ( <i>A. Tsarenko, O. Samokhlib, V. Tiahni, L. Oliinyk</i> ) .....	162
Design and Manufacturing of Unmanned Aerial Vehicles Through Innovative Technologies and Engineering Solutions ( <i>V. Holovenskyi, V. Malovanyi, I. Vasin, M. Putyr</i> ) .....	174
Modeling the Behavior of the Failure Intensity Function of Mechanical Type Aviation Equipment Using the Diffusion-Monotone Distribution Law of Random Variables ( <i>I. Safonov, I. Korovin</i> ) .....	185
Improved Set of Partial Indicators for Performance Evaluation of Military Communication Systems Using Mesh Networking Technology ( <i>O. Bilous</i> ) .....	195
<b>DEVELOPMENT OF FORMS AND METHODS OF TRAINING FOR THE AIR COMPONENT ARMS AND SERVICES</b> .....	205
Analysis of the Activities of Air Force Capability Coalitions and Integrated Air and Missile Defense Within the Framework of International Military Cooperation During the Repelling of Armed Aggression ( <i>V. Malovanyi, V. Zhurid, M. Kapinos, R. Yakovliev</i> ) .....	205
Paper Template .....	212

# Editorial Board

*Anatolii SALII*

candidate of military sciences, professor

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

## *Editorial Board Members:*

*Oleksandr AVRAMENKO*

doctor of technical sciences, associate professor

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

*Tymur KURTSEITOV*

doctor of technical sciences, professor

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

*Pavlo SHCHYPANSKYI*

candidate of military sciences, professor

ORCID: [0000-0002-0854-733X](https://orcid.org/0000-0002-0854-733X)

*Pavlo OPENKO*

candidate of technical sciences, senior researcher

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

*Serhii BAZILO*

PhD

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

*Oleh ZEMLIANSKYI*

doctor of technical sciences, professor

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

*Valentyna LOBOICHENKO*

doctor of technical sciences, professor

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

*Oleh BARABASH*

doctor of technical sciences, professor

ORCID: [0000-0003-1715-0761](https://orcid.org/0000-0003-1715-0761)

*Oleksandr OLEKSENKO*

PhD

ORCID: [0000-0002-6853-9630](https://orcid.org/0000-0002-6853-9630)

*Pawel BERNAT*

PhD

ORCID: [0000-0002-8150-9794](https://orcid.org/0000-0002-8150-9794)

*Volodymyr HERASIMENKO*

doctor of military sciences

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

*Rustam MURASOV*

Doctor of Technical Sciences

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

*Serhii KOROTIN*

candidate of technical sciences, professor

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

*Mykola MIRONYUK*

Candidate of military sciences, senior researcher

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

*Yurii KOLOMIETS*

PhD

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

*Yevhen HAVRYLKO*

doctor of technical sciences, professor

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

*Yurii KRAVCHENKO*

doctor of technical sciences, professor

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

*Hryhorii RADZIVILOV*

candidate of technical sciences, professor

ORCID: [0000-0002-6047-1897](https://orcid.org/0000-0002-6047-1897)

*Petro STESHENKO*

candidate of technical sciences, senior researcher

ORCID: [0000-0003-1432-6864](https://orcid.org/0000-0003-1432-6864)

*Zdenek VINTR*

PhD, professor

ORCID: [0000-0003-3128-0802](https://orcid.org/0000-0003-3128-0802)

*Olha SVYNCHUK*

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

ORCID: [0000-0001-9032-6335](https://orcid.org/0000-0001-9032-6335)

## *Technical Editors*

*Oleksiy MAYSTROV*

Candidate of Technical Sciences, associate professor

*Yaroslav YAROSHENKO*

PhD

# РОЗВИТОК ТА ОПЕРАТИВНЕ МИСТЕЦТВО ПОВІТРЯНИХ СИЛ

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-5-19**

**УДК: 355.4:355.40:623.746**

**Габідулін Ібрагім Абдулович** (кандидат технічних наук, доцент)  
<https://orcid.org/0009-0009-7860-7818>

*Центр досліджень армії, конверсії та розбросення, Київ, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 06.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 30.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## ГЕНЕЗИС ТА ЕВОЛЮЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ A2/AD: ВІД ДЕТЕРМІНОВАНИХ СИСТЕМ ППО ДО МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНОГО ПРОТИБОРСТВА

*У статті досліджується еволюція концепції “недопущення доступу / заперечення зони” (Anti-Access/Area Denial) та механізми її подолання у сучасних багатодомених операціях. На основі міждисциплінарного аналізу військових доктрин, теорії мережево-центричних бойових дій і сучасних операційних кейсів показано, що вирішальним чинником успіху стає не кількість платформ або вогнева міць, а рівень інтеграції сенсорів, засобів управління та систем ураження в єдину інформаційно-операційну архітектуру. Доведено, що руйнування інформаційної цілісності системи протиповітряної оборони може бути ефективнішим за її фізичне знищення. Обґрунтовано взаємозв'язок між теоретичними моделями управління в умовах інформаційної невизначеності та практичними результатами сучасних операцій. Зроблено висновок, що майбутні конфлікти визначатимуться здатністю сторін управляти інформаційним середовищем і темпом прийняття рішень, тоді як технологічна перевага виступає лише інструментом реалізації політичної стратегії.*

**Ключові слова:** A2/AD, SEAD, DEAD, мережево-центрична війна, мережа ураження, інформаційне домінування, система управління військами, багатодоменні операції, протиповітряна оборона, бойові мережі, стратегія сучасної війни.

### Вступ

Сучасний характер воєнних конфліктів визначається глибокою трансформацією співвідношення між технологіями, інформацією та управлінням. Одним із ключових феноменів цієї трансформації стала поява концепції Anti-Access/Area Denial (A2/AD), яку доцільно перекладати українською як концепція недопущення доступу та заперечення зони, що позначає системний комплекс заходів і засобів, спрямованих на обмеження свободи дій противника в операційному середовищі. Первісно сформована як асиметрична відповідь слабшої сторони на перевагу противника у проекції сили, ця концепція з часом перетворилася на універсальну модель побудови оборонних систем у різних доменах бойового простору.

У військово-теоретичному дискурсі A2/AD довгий час сприймалася як майже непроникна “зона обмеженого доступу”, подолання якої вимагало непропорційних ресурсів і ризиків. Водночас розвиток інформаційних технологій, мережових архітектур управління та алгоритмічних систем обробки даних поступово змінив уявлення про характер протиборства. З'ясувалося, що ключовою вразливістю інтегрованих оборонних систем є не їхня вогнева міць, а системна залежність від інформаційної цілісності та безперервності управління.

Актуальність дослідження зумовлена

необхідністю переосмислення ролі A2/AD у сучасній війні та визначення механізмів її подолання в умовах багатодомених операцій. Особливого значення це набуває для держав, які змушені протидіяти технологічно складним інтегрованим оборонним системам противника або, навпаки, розробляють власні інтегровані системи стримування.

**Мета статті** – дослідити еволюцію концепції A2/AD, виявити її системні вразливості та проаналізувати принципи сучасних операцій прориву таких систем у контексті розвитку військової теорії та практики.

Завдання дослідження:

проаналізувати походження та розвиток концепції A2/AD;

розглянути її місце у сучасній військовій доктрині;

визначити роль інформаційного домінування у прориві оборонних систем;

дослідити взаємозв'язок між технологічними, операційними та політико-стратегічними чинниками;

сформулювати узагальнення щодо трансформації природи військової переваги.

### Матеріали та методи

Дослідження ґрунтується на поєднанні теоретичного аналізу військових концепцій, аналізу відкритих джерел та порівняльного вивчення сучасних операцій протидії системам

A2/AD.

Матеріальною основою дослідження стали:

- доктринальні документи збройних сил США та НАТО, зокрема Joint Publication 3-01;
- наукові праці з теорії мережево-центричних операцій і управління бойовими системами;
- аналітичні матеріали міжнародних дослідницьких центрів (RAND, CSIS);
- відкриті джерела, що містять інформацію про перебіг сучасних військових операцій;
- публікації з питань розвитку систем протиповітряної оборони та концепції A2/AD.

У роботі використано комплекс взаємодоповнюючих методів дослідження.

Теоретичний аналіз і синтез застосовано для узагальнення існуючих підходів до розуміння концепції A2/AD та її еволюції у військовій доктрині.

Метод кейс-аналізу використано для реконструкції логіки конкретної операції прориву системи протиповітряної оборони, що дозволило дослідити взаємодію елементів SEAD/DEAD, функціонування сенсорних мереж та механізми руйнування інформаційної цілісності оборонної системи.

Порівняльний аналіз застосовано для зіставлення ієрархічних та мережових архітектур управління бойовими системами, зокрема моделей kill chain і kill web.

Системний підхід дозволив розглядати систему A2/AD не лише як сукупність окремих засобів ураження, а як інтегровану інформаційно-керуючу структуру, у якій сенсори, канали зв'язку, центри управління та засоби ураження функціонують як єдина мережа.

Крім того, використано елементи концептуального моделювання, що дозволило інтерпретувати результати сучасних операцій у контексті теорії управління складними системами та математичних моделей деградації централізованих структур управління в умовах інформаційного перевантаження.

Поєднання зазначених методів забезпечило можливість інтегрувати доктринальний, операційний та стратегічний рівні аналізу і сформуванню цілісне уявлення про механізми подолання систем A2/AD у сучасних багатодомених операціях.

## Результати

*1. Концепція A2/AD як система та еволюція підходів до її подолання*

*1.1. Походження концепції A2/AD.* Концепція A2/AD сформувалася не як абстрактна теоретична модель, а як практична відповідь на конкретний стратегічний дисбаланс періоду Холодної війни [1, 2]. Радянський Союз, усвідомлюючи свою обмежену спроможність до глобальної проєкції сили на океанських театрах у порівнянні зі Сполученими Штатами Америки, зробив ставку на асиметричні засоби стримування [3].

Сутність цього підходу полягала не у прагненні знищити авіаносні ударні групи противника, а у створенні таких умов, за яких їх застосування

ставало б надмірно ризикованим з військової та політичної точки зору [1]. Далекобійна авіація, протикорабельні ракети, ешелонувана протиповітряна оборона, розгалужена мережа радіолокаційних засобів і централізована система управління утворювали архітектуру стримування, покликану обмежити свободу дій противника ще до початку активної фази бойових дій [2].

У цьому первісному вигляді A2/AD функціонувала передусім як інструмент стратегічного стримування, а не як концепція “непроникної оборони”, що є принципово важливим для коректного розуміння її подальшої еволюції [3].

*1.2. A2/AD як предмет західної військово-теоретичної дискусії.* Після завершення Холодної війни концепція A2/AD не зникла, а зазнала концептуальної реконцептуалізації в західній військово-теоретичній думці, насамперед у контексті зростання військових спроможностей Китаю, Ірану та Російської Федерації [2].

У 2000–2010-х роках вона стала предметом системних досліджень і стратегічних дискусій у провідних аналітичних центрах оборонної політики, зокрема в роботах Center for Strategic and Budgetary Assessments [1], RAND Corporation [5] та International Institute for Strategic Studies [6].

У цих дослідженнях A2/AD розглядалася вже не лише як оборонна модель слабшої сторони, а як комплексна операційно-стратегічна архітектура, здатна обмежувати свободу дій навіть технологічно переважаючого противника та змінювати баланс сил на регіональному рівні [4].

*1.3. Критика концепції A2/AD у військово-морській доктрині США.* Важливий етап переосмислення A2/AD пов'язаний з критикою, висловленою тодішнім начальником військово-морських операцій США (Chief of Naval Operations) адміралом Джоном Річардсоном у програмному документі [7].

Він наголошував, що термін A2/AD є зручним аналітичним ярликом, але водночас небезпечним спрощенням, оскільки формує уявлення про статичну “зону заборони”, тоді як у реальності йдеться про динамічну систему взаємопов'язаних спроможностей.

Річардсон пропонував змістити фокус з питання “як прорватися в зону” на питання руйнування системи, що цю зону створює і підтримує. Такий підхід передбачав багатодоменні дії, інтеграцію морського, повітряного, кібернетичного та електромагнітного середовищ, а також цілеспрямований вплив на систему управління, розвідки та прийняття рішень противника [7].

Ця логіка стала важливим концептуальним містком між теоретичними дискусіями початку 2000-х років і подальшою доктринальною фіксацією підходів до протидії A2/AD у багатодомених операціях.

*1.4. SEAD і DEAD як практичні механізми подолання A2/AD.* Після того як у військово-морській і міжвидовій доктрині США було

поставлено під сумнів уявлення про A2/AD як “непроникну зону”, логічно постало питання чи не можна її подолати, а як саме це робиться на практиці. Відповіддю стали концепції SEAD і DEAD, які задовго до появи самого терміна A2/AD сформували ядро американського підходу до боротьби з протиповітряною обороною противника.

*Походження термінів.* Операції придушення засобів ППО активно застосовувалися вже під час війни у В’єтнамі, коли стало очевидно, що радянські зенітно-ракетні комплекси С-75 створюють якісно нову загрозу для авіації [8]. Сам термін SEAD (Suppression of Enemy Air Defenses) сформувався у 1970-х роках у процесі доктринального осмислення бойового досвіду.

Початково SEAD означав тимчасове придушення елементів ППО – шляхом радіоелектронної боротьби, вогневого ураження, демонстративних маневрів і примусу розрахунків ЗРК до вимкнення радарів. Його стандартизоване визначення закріпилося в американських та нагівських нормативних документах і сьогодні визначається як комплекс дій із нейтралізації, тимчасового приглушення або знищення засобів протиповітряної оборони противника [9].

Надалі, у 1980–1990-х роках, у професійній військовій літературі США з’являється більш жорстке поняття DEAD (Destruction of Enemy Air Defenses) – фізичне знищення елементів системи ППО: радарів, пускових установок, командних пунктів і вузлів зв’язку. Якщо SEAD мав на меті “осліпити” оборону на певний час, то DEAD – вивести її з ладу структурно.

У сучасній американській доктрині ці поняття розглядаються не як альтернативні, а як взаємодоповнюючі фази єдиного процесу [9].

*Доктринальне закріплення.* У документі *Joint Publication 3-01 Countering Air and Missile Threats* SEAD і DEAD зафіксовані як складові системної боротьби з повітряними й ракетними загрозами [9]. Документ прямо виходить з того, що сучасна протиповітряна оборона є мережевою системою, а отже її нейтралізація потребує:

- порушення сенсорного рівня (радіолокація, оптико-електронні засоби);
- руйнування або дезорганізації системи управління і зв’язку (С2);
- фізичного ураження ключових вузлів у критичні моменти.

Таким чином, SEAD і DEAD у доктрині США – це інструменти розриву kill chain противника, що безпосередньо пов’язує їх із критикою A2/AD як статичної “бульбашки” [11].

*Історичний досвід застосування.* Класичним прикладом ефективного застосування SEAD/DEAD стала кампанія НАТО проти Югославії у 1999 році, детально проаналізована Бенджаміном Лембетом [12]. Попри обмежені масштаби фізичних втрат, сербська ППО була позбавлена можливості діяти як єдине ціле, що забезпечило коаліції повну свободу дій у повітрі.

Цей досвід закріпив ключовий висновок:

знищення всієї ППО не є необхідною умовою повітряного панування – достатньо зруйнувати її зв’язність, керованість і передбачуваність.

*Логічний перехід до Каракаса.* Саме в цій логіці слід розглядати і події в Каракасі у 2026 році. Операція “Absolute Resolve” [13, 14, 15] продемонструвала класичну послідовність SEAD → DEAD:

- спочатку – радіоелектронне “осліплення” і дезорганізація сенсорів;
- далі – точкове фізичне ураження активованих елементів;
- у підсумку – розпад системи ППО як єдиного механізму.

Це дозволяє перейти до наступного підрозділу – аналізу того, як саме kill chain венесуельської ППО була зламана і чому наступаюча сторона діяла вже в логіці kill web, що принципово змінює характер протиборства.

*1.5. Kill chain і kill web: структурна вразливість A2/AD.* Однією з ключових причин провалу венесуельської системи A2/AD стала асиметрія логік управління бойовими діями, що проявилася у зіткненні двох різних моделей ураження: kill chain та kill web.

Концепція kill chain як послідовної моделі ураження сформувалася в межах розвитку американської військової доктрини та передбачає лінійну послідовність дій – від виявлення до ураження цілі (Find–Fix–Track–Target–Engage–Assess). У мережево-центричному вимірі ця модель описується як функціонально зв’язаний ланцюг сенсорів, командних пунктів і засобів ураження [9, 10].

Мережева модель ураження, kill web або battle networks, розвинулася як еволюція мережевоцентричних підходів у багатодомених операціях і передбачає множинність шляхів передачі інформації та прийняття рішень [16, 10]. На відміну від kill chain, вона не потребує жорсткої послідовності та має надлишкові канали обробки даних, що забезпечує стійкість до втрати окремих елементів.

Традиційна архітектура протиповітряної оборони, на якій ґрунтувалася оборона Каракаса, відповідала логіці kill chain – лінійного ланцюга ураження з централізованим управлінням [3]. Така модель характерна для індустріальної епохи війни й передбачає жорстку залежність між сенсорами, командними пунктами та ефекторами.

У венесуельському випадку ця логіка проявлялася у зв’язці:

- китайських радарів метрового діапазону JY-27,
- централізованих пунктів управління,
- зенітно-ракетних комплексів С-300 [13, 14].

Порушення будь-якого з ключових елементів цього ланцюга – передусім сенсорного або командного – призводило до розриву всієї системи ураження. Саме це і було досягнуто на етапі SEAD шляхом радіоелектронного впливу на радіолокаційні засоби, що позбавило ЗРК можливості отримувати цілевказання. Подальші

дії DEAD завершили руйнування цієї архітектури шляхом фізичного знищення активних вузлів.

На противагу цьому, атакуюча сторона діяла у логіці kill web – мережевої моделі ураження, що є розвитком мережевоцентричної війни [10, 16]. У такій моделі:

- сенсори, платформи управління та засоби ураження не мають жорсткої ієрархії;
- інформація агрегується з багатьох джерел;
- рішення можуть ухвалюватися децентралізовано;
- втрата окремого вузла не призводить до деградації всієї системи.

У ході операції Absolute Resolve цю логіку забезпечували:

- багатоцільові літаки F-35 як багатоспектральні сенсори,
- розвідувальні БПЛА, зокрема RQ-170 Sentinel [17-19],
- платформи радіоелектронної боротьби,
- інтегровані системи злиття даних і управління типу Lattice [20, 21].

Таким чином, навіть у разі втрати окремих сенсорів або каналів зв'язку загальна картина бою зберігалася, а система управління залишалася функціонально стійкою.

Зіткнення kill chain та kill web у Каракасі продемонструвало принципову обмеженість класичних A2/AD-архітектур, побудованих на централізованому управлінні. Система ППО виявилася вразливою не через нестачу засобів ураження, а через структурну нездатність зберегти цілісність управління в умовах багатодоменного впливу.

Саме цей структурний фактор пояснює швидкий колапс венесуельської системи A2/AD після початку операції.

## 2. Практичне подолання A2/AD: кейс Венесуели.

### 2.1. Передопераційне середовище та підготовка кампанії.

Як показано в попередньому розділі, структурна вразливість централізованих A2/AD-архітектур проявляється насамперед у сфері управління та інформаційної цілісності. Тому практичне подолання таких систем починається задовго до першого кінетичного удару.

Фундаментом операції є формування операційного середовища, у якому противник поступово втрачає здатність діяти як інтегрована система. Йдеться не лише про розвідувальну підготовку, а про комплекс дипломатичних, інформаційних, економічних і психологічних заходів, спрямованих на ізоляцію цілі та зниження стійкості її військової структури.

Такий підхід відповідає принципам загальної (тотальної) стратегії, сформульованим Андре Бофром [22], згідно з якими військова дія має завершувати процес, уже підготовлений політичними, інформаційними та психологічними інструментами впливу. У цьому сенсі кінетична фаза операції є не початком, а кульмінацією довготривалої системної кампанії.

У випадку Венесуели підготовчий етап включав поступове формування сприятливого міжнародного середовища, інформаційний тиск, демонстрацію сили та розгортання розвідувальних можливостей, що дозволило перейти до активної фази вже за умов частково дезорганізованої системи управління [13, 14].

### 2.2. Фаза SEAD: дезінтеграція сенсорного поля A2/AD.

Першою військовою фазою подолання системи A2/AD є не знищення засобів противника, а позбавлення їх здатності бачити та координуватися. У доктринальних документах Збройних Сил США цей етап визначається як SEAD – придушення систем протиповітряної оборони шляхом впливу на їхні сенсори, канали зв'язку та систему управління [9].

Згідно з положеннями [9], SEAD передбачає комплекс дій, спрямованих на тимчасове або часткове виведення елементів ППО з функціонального стану, не обов'язково їх фізичне знищення. Йдеться насамперед про порушення інформаційної цілісності системи – саме того елементу, на якому тримається будь-яка архітектура A2/AD.

У випадку венесуельської операції ключовою ціллю першої фази стало сенсорне поле протиповітряної оборони, зокрема далекобійні радіолокаційні станції, що забезпечували дальнє виявлення та цілевказання зенітним ракетним комплексам [13, 14].

Порушення їхньої роботи призводить до системного ефекту:

- розривається інформаційний зв'язок між сенсором і пусковою установкою;
- руйнується ланцюг прийняття рішення;
- кожна батарея ППО змушена діяти ізольовано;
- система втрачає властивість цілісності.

Саме в цьому проявляється фундаментальна відмінність між знищенням засобу і знищенням системи. Зенітний комплекс може залишатися фізично неушкодженим, але без сенсорного поля та мережевої координації він перетворюється на локальний автономний вузол із різко зниженими можливостями.

Такий ефект відповідає логіці оперативного мистецтва, сформульованій у класичній стратегічній теорії [22], згідно з якою найефективніший спосіб зламати оборону полягає не в її фізичному руйнуванні, а в позбавленні противника свободи організованої дії. Як зазначав Андре Бофр, стратегія прагне позбавити противника свободи дії.

У практичному вимірі це означає перехід від класичної моделі протидії ППО – прямого осліплення системи. Саме тому в сучасних операціях SEAD дедалі частіше реалізується засобами радіоелектронної боротьби, кібероперацій та багатодоменного впливу, тоді як кінетичні удари здійснюються після втрати системою здатності до скоординованої реакції [9, 10].

У практичному вимірі це означає перехід від класичної моделі протидії ППО – прямого знищення позицій – до моделі інформаційного осліплення системи. Саме тому в сучасних операціях SEAD дедалі частіше реалізується засобами радіоелектронної боротьби, кібероперацій та багатодоменного впливу, тоді як кінетичні удари здійснюються після втрати системою здатності до скоординованої реакції [9, 10].

У розглянутій операції ключову роль відіграла інтегруюча цифрова архітектура управління бойовим середовищем типу Lattice [20, 21], яка забезпечувала зведення даних від розрізнених сенсорів у єдину оперативну картину.

Основними пасивними сенсорами виступали малопомітні літаки F-35, оснащені комплексом радіоелектронної розвідки AN/ASQ-239, що дозволяє визначати координати радіолокаційних станцій за їхнім випромінюванням без увімкнення власного радара [17].

Наступною ланкою були літаки радіоелектронної боротьби EA-18G Growler, які здійснювали спрямоване придушення сигналів радіолокаційних станцій. Для операторів ППО це означало втрату достовірної повітряної обстановки та неможливість формування цілевказання.

Після дезорганізації сенсорного поля координати передавалися ударним платформам (B-1B, F/A-18), які застосовували високоточні засоби ураження великої дальності, зокрема ракети AGM-158 JASSM. Таким чином реалізовувався принцип сучасної операційної війни: кінетичний удар наноситься лише після втрати противником системної здатності реагувати як єдине ціле.

*2.3. Мережево-центричний контур управління операцією.* Ключовою передумовою ефективності операції стало не лише технічне переважання засобів ураження, а наявність інтегрованого інформаційно-управлінського контуру, що об'єднував сенсори, аналітичні модулі та виконавчі платформи в єдину систему.

Така архітектура відповідає концепції мережевоцентричної війни (network-centric warfare), описаній у фундаментальній праці [10], де підкреслюється, що вирішальною перевагою сучасних сил є не кількість платформ, а рівень інформаційної інтеграції між ними.

У межах цієї логіки сенсорні системи – стелс-авіація, розвідувальні БпЛА, космічні засоби спостереження та радіоелектронна розвідка – формують єдине поле даних, яке в реальному часі обробляється алгоритмічними системами підтримки рішень і передається засобам ураження [9, 10].

Подібна архітектура отримала в сучасній військовій теорії назву мережі ураження (kill web) [16]. На відміну від класичного “ланцюга ураження” (kill chain), де кожна ланка жорстко залежить від попередньої, у мережевій моделі втрата окремого сенсора або платформи не призводить до руйнування системи в цілому,

оскільки функціональність автоматично перерозподіляється між іншими елементами мережі.

Саме така логіка забезпечує стійкість операцій у середовищі інформаційного протиборства, де противник активно застосовує засоби радіоелектронного впливу та кібероперації. У цьому сенсі сучасна операція придушення ППО є не просто застосуванням високоточної зброї, а результатом функціонування складної кібернетичної системи управління боєм [11].

*2.4. Фаза DEAD: фізична нейтралізація елементів системи A2/AD.* Після досягнення інформаційної переваги та дезінтеграції сенсорного поля противника логічним продовженням операції стала фаза DEAD – безпосереднє фізичне знищення елементів системи протиповітряної оборони. На відміну від етапу SEAD, метою якого є тимчасове придушення функціонування ППО, фаза DEAD передбачає остаточну ліквідацію ключових вузлів оборонної архітектури, включаючи радіолокаційні станції, пускові установки, командні пункти та засоби зв'язку [9].

У доктринальному вимірі цей етап розглядається як завершальна стадія боротьби за домінування в повітрі, коли противник уже позбавлений здатності координувати оборону та змушений діяти фрагментарно [9]. Ефективність DEAD визначається не кількістю нанесених ударів, а точністю вибору моменту їх застосування – тобто тоді, коли система управління ППО вже втратила функціональну цілісність.

У розглянутій операції ця логіка проявилася у класичній формі: після дезорганізації інформаційного поля оборони радіолокаційні комплекси, що періодично активувалися для уточнення обстановки, автоматично ставали демаскуючими цілями. Будь-яке випромінювання сенсора миттєво фіксувалося засобами пасивної радіотехнічної розвідки і використовувалося для наведення високоточної зброї [13].

Подібна схема відповідає принципам багатодомених операцій: сенсор, система обробки даних і засіб ураження функціонують як інтегрована система [10]. За таких умов навіть короткочасне включення радара може призводити до втрати позиції через її технічне самовикриття.

За наявними відкритими оцінками, у фазі фізичного знищення елементів оборони могли застосовуватися високоточні боеприпаси повітряного базування великої дальності, що запускалися з платформ, розташованих поза зоною ураження зенітних ракетних комплексів [13, 23]. Такий підхід мінімізує ризики для ударної авіації та дозволяє проводити системне “розбирання” оборонної архітектури противника без входження у зону його вогневого впливу.

Ключовим наслідком цього етапу стало перетворення формально багаторівневої системи протиповітряної оборони на набір ізольованих, неузгоджених елементів. Втрата зв'язку між сенсорами, командними пунктами та пусковими

установками означала фактичний розрив класичного ланцюга ураження (kill chain) оборонної сторони [10]. Натомість атакуюча сторона діяла в рамках мережі ураження (kill web) [16], що забезпечувало їй структурну стійкість навіть у разі втрати окремих платформ або каналів зв'язку.

Таким чином, фаза DEAD не була самостійною операцією, а стала закономірним результатом попереднього руйнування інформаційної цілісності оборонної системи. Саме послідовність “дезорганізація → ізоляція → знищення” демонструє сучасну логіку подолання A2/AD-архітектур, де вирішальну роль відіграє не масованість удару, а системність впливу.

*2.5. Домінування в повітрі як операційний перелом.* Досягнення домінування в повітрі історично вважається ключовою умовою успішного ведення сучасних операцій. У доктринальних документах США воно визначається як такий ступінь контролю повітряного простору, за якого противник не здатний ефективно перешкоджати діям власних сил [9]. Саме цей стан означає не просто перевагу в повітрі, а втрату противником можливості впливати на перебіг операції як системою.

У розглянутому кейсі перелом настав не в момент першого удару, а тоді, коли оборонна система втратила здатність формувати узгоджену повітряну обстановку. Після руйнування сенсорного поля та фізичного знищення ключових вузлів ППО противник опинився в ситуації інформаційної деградації. Засоби виявлення та управління більше не забезпечували цілісного контролю повітряного простору, що означало фактичну втрату ініціативи в повітрі.

Такий момент відповідає класичним принципам оперативного мистецтва: перелом досягається не тоді, коли противник повністю знищений, а тоді, коли він втрачає можливість організовано діяти. Саме тому сучасні концепції подолання A2/AD роблять акцент не на масованості ударів, а на послідовному руйнуванні функціональних зв'язків системи [1].

Водночас досягнуте домінування в повітрі не є статичним станом. У багатодоменному середовищі воно підтримується безперервною роботою сенсорів, систем управління та засобів ураження, інтегрованих у мережеву архітектуру [10]. Отже, домінування – це не одноразова подія, а динамічний процес, який залежить від здатності сторони підтримувати безперервність інформаційного циклу “спостереження, орієнтації, рішення та дії” (Observe–Orient–Decide–Act, OODA) [24].

У сучасних дослідженнях оперативного мистецтва, що аналізують бойові мережі (battle networks), підкреслюється, що саме інформаційна цілісність виступає центром ваги системи [16]. Втрата цієї цілісності означає системну деградацію, навіть якщо частина засобів ураження формально зберігається.

Таким чином, у межах цієї операції

домінування в повітрі стало не наслідком чисельної або технічної переваги, а результатом правильно побудованої послідовності дій:

дезінтеграція сенсорів → руйнування управління → ізоляція вузлів → точкове знищення.

Саме така логіка дедалі частіше визначає характер сучасних кампаній і пояснює, чому навіть складні багаторівневі системи оборони можуть втрачати ефективність за відносно короткої строки.

*2.6. Операція як модель сучасного прориву A2/AD.* Розглянута операція демонструє принципово важливу зміну у способах подолання систем A2/AD. Якщо у традиційній військовій думці прорив оборони асоціювався з концентрацією сил і масованим ударом, то сучасна практика підтверджує іншу закономірність: ефективність досягається через дезорганізацію системи управління противника, а не через фронтальне знищення його засобів.

Ключовим фактором стала інтеграція сенсорів, засобів РЕБ, платформ ураження і командних систем у єдину бойову мережу [9, 10]. Саме така архітектура дозволила здійснювати дії не послідовно, а паралельно, що різко скорочує цикл прийняття рішень і створює ефект операційної асиметрії. У результаті сторона, яка діяла в мережевій логіці, нав'язала противнику темп подій, з яким той не зміг синхронізувати свої реакції.

Цей висновок узгоджується з положеннями сучасної теорії оперативного мистецтва, згідно з якою вирішальним фактором стає здатність інтегрувати дії в різних доменах у єдиний інформаційний цикл [16]. У такій системі навіть складна оборонна архітектура може втратити стійкість, якщо порушується взаємодія її елементів.

Принципове значення має також різниця в логіці функціонування систем. Оборонна сторона діяла у межах класичного kill chain – структурованого ланцюга прийняття рішень. Натомість наступальна сторона застосовувала архітектуру kill web – розподілену мережу, здатну адаптуватися до втрат окремих вузлів [10, 16]. Саме ця різниця пояснює, чому навіть часткове порушення каналів зв'язку спричинило системну деградацію оборони.

Таким чином, операція підтверджує кілька фундаментальних закономірностей сучасної війни:

- інформаційна перевага набуває більшого значення, ніж суто платформна;
- швидкість інтеграції систем перевищує за значенням концентрацію маси сил;
- мережеві структури демонструють вищу стійкість порівняно з жорстко ієрархічними;
- руйнування контурів управління часто є ефективнішим, ніж пряме знищення бойових засобів.

У сукупності це дозволяє трактувати розглянутий кейс не як ізольований епізод, а як прояв тенденції формування нового типу операцій,

у яких головним об'єктом впливу стає система прийняття рішень противника.

Саме тому подібні операції дедалі частіше розглядаються у військовій теорії як модель майбутніх кампаній проти складних багаторівневих оборонних систем.

### 3. Стратегічні уроки сучасних операцій прориву A2/AD

3.1. Трансформація природи воєнної переваги. Розглянутий кейс свідчить про трансформацію природи військової переваги у сучасних конфліктах. Якщо в класичній військовій теорії вирішальним фактором вважалася кількісна концентрація сил або технологічна перевага окремих засобів ураження, то сучасні операції демонструють зростання ролі системної інтеграції [3, 10].

У межах індустріальної моделі війни перевага асоціювалася з масою сил, дальністю ураження та гарантованою відповіддю. Проте в умовах мережево-центричного протистояння визначальним чинником стає здатність об'єднати сенсори, системи управління, засоби впливу та аналітичні алгоритми в єдиний операційний контур [10].

Таким чином, перевага поступово зміщується від окремої платформи до архітектури взаємодії. Система, що забезпечує швидке злиття даних, скорочений цикл прийняття рішень і адаптивність у багатодомному середовищі, отримує структурну перевагу навіть за відсутності абсолютної технічної домінації.

У таких умовах навіть технологічно потужна оборонна система може втратити ефективність, якщо вона не здатна підтримувати інформаційну цілісність та стійкість управління [11]. Саме тому у сучасній військовій думці дедалі частіше наголошується, що центром ваги стає не фізичний компонент сил, а здатність системи підтримувати безперервність інформаційного циклу.

3.2. Від платформи до мережі: нова логіка сили. Порівняльний аналіз показує, що традиційна модель бойових дій базувалася на концепції платформи – танка, літака, корабля як основної одиниці сили.

Натомість сучасна війна переходить до мережевої логіки, у якій платформа є лише вузлом системи [10, 11]. Вирішального значення набуває не ізольована бойова спроможність окремого засобу, а його включеність у єдиний інформаційно-управлінський контур.

У межах мережевої архітектури:

- знищення окремої платформи не призводить до руйнування системи в цілому;
- функції можуть перерозподілятися між вузлами;
- управління набуває розподіленого характеру;
- швидкість реакції зростає завдяки інформаційній синхронізації [10].

Це підтверджує висновок сучасної теорії мережевоцентричних операцій: бойова ефективність визначається не кількістю сил, а якістю зв'язків між ними [10, 24]. Саме

взаємозв'язки, а не окремі платформи, стають головним джерелом переваги, оскільки дозволяють скорочувати цикл “спостереження – орієнтації – прийняття рішення – дії” (OODA) [24].

Практичним доктринальним втіленням цієї логіки є концепція Joint All-Domain Command and Control (JADC2) – інтегрованої системи міжвидового управління, що об'єднує сенсори, командні центри та засоби ураження у всіх доменах бойового простору (повітряному, наземному, морському, космічному та кіберпросторі) в єдину інформаційно-керуючу мережу [25]. Її мета полягає у забезпеченні переваги в швидкості прийняття рішень та формуванні спільної операційної картини, що дозволяє синхронізувати дії різнорідних сил у реальному часі.

У цьому контексті платформа перестає бути основним елементом сили й перетворюється на модуль у ширшій системі управління.

3.3. Пріоритет інформаційного домінування. Події засвідчили, що ключовим об'єктом боротьби стає інформаційне середовище бою. Контроль над інформацією дозволяє:

- формувати картину бойової обстановки;
- прогнозувати поведінку противника;
- скорочувати цикл прийняття рішень;
- випереджувати противника в темпі операції [11, 6].

У цьому контексті актуалізується класичний принцип стратегічної теорії, сформульований Лідделлом Гартом: “Стратегія прагне позбавити противника свободи дій” [26]. Сучасна інтерпретація цього положення пов'язана не лише з фізичним обмеженням маневру, а й із порушенням здатності противника адекватно сприймати обстановку та приймати узгоджені рішення.

У мережевоцентричному середовищі такий ефект досягається шляхом дезорганізації інформаційних потоків, порушення сенсорних мереж, перевантаження або фрагментації каналів управління, а також створення когнітивної невизначеності [11]. У результаті інформаційна дезинтеграція системи управління може виявитися ефективнішою, ніж її пряме фізичне руйнування.

Це узгоджується з ширшим теоретичним висновком сучасної військової науки: контроль над інформацією трансформується у форму стратегічної сили. За певних умов саме здатність підтримувати інформаційну цілісність і скорочувати власний цикл рішень може нейтралізувати навіть технологічно сильнішого противника [24, 10].

Отже, інформаційне домінування поступово переходить із допоміжного елемента бойових дій у категорію їх центральної умови.

3.4. Політико-стратегічний вимір операцій. Операції сучасного типу мають не лише військовий, а й стратегічно-політичний вимір. Як підкреслював Андре Бофр, війна є передусім боротьбою волі, а не матеріальних ресурсів [22]. З цього випливає фундаментальний висновок: навіть

найуспішніша військова операція не гарантує досягнення стратегічної мети, якщо вона не підкріплена політичними, дипломатичними, інформаційними та економічними заходами [22, 27].

Аналіз сучасних кампаній демонструють кілька закономірностей:

- темп і швидкість військової фази істотно впливають на формування стратегічного результату [27];
- легітимність підсумку може мати більше значення, ніж масштаб тактичного успіху [22];
- міжнародна реакція здатна змінити баланс сил після завершення операції [9];
- рівень внутрішньої підтримки суспільства визначає стійкість досягнутого результату [26].

Таким чином, військовий успіх виступає лише одним елементом ширшої системи стратегічної дії. Якщо він не інтегрований у загальну політичну архітектуру післяопераційного врегулювання, тактична перемога може не трансформуватися у стабільний стратегічний результат.

Цей висновок узгоджується з класичною стратегічною логікою: ефективна стратегія – це не максимізація руйнування, а досягнення бажаного політичного стану з мінімально необхідним застосуванням сили [26]. Саме тому сучасні високотехнологічні операції доцільно оцінювати не лише за показниками бойової ефективності, а й за їх здатністю формувати керований політичний результат.

*3.5. Значення для розвитку військової теорії.* З наукової точки зору розглянутий кейс становить інтерес як емпіричний матеріал для перевірки низки теоретичних положень, що тривалий час існували переважно у вигляді концептуальних моделей або аналітичних припущень у дослідженнях мережево-центричних операцій та систем A2/AD.

По-перше, аналіз свідчить про переваги мережевої організації бойових систем над жорстко ієрархічною. Система, побудована як розподілена мережа взаємопов'язаних вузлів, демонструє вищу стійкість до втрат окремих елементів, ніж централізована структура управління. Цей висновок узгоджується з положеннями теорії мережево-центричних операцій, відповідно до якої бойова ефективність визначається рівнем інформаційної інтеграції, а не лише кількістю сил або характеристиками окремих платформ [11, 28].

По-друге, спостерігається підтвердження тези про те, що інформаційна перевага здатна частково нівелювати технічну. Навіть складні системи протиповітряної оборони можуть втрачати ефективність якщо порушується цілісність їх інформаційного контуру, тобто зв'язку між сенсорами, центрами управління і засобами ураження [11, 29].

По-третє, помітно зростає роль швидкості інтеграції систем. В умовах сучасного бою вирішальним чинником стає не максимальна дальність ураження або потужність окремої платформи, а здатність системи швидко збирати,

обробляти та передавати інформацію між вузлами мережі. У цьому сенсі темп інформаційного циклу безпосередньо трансформується у темп операції [6, 11].

По-четверте, розглянутий кейс узгоджується з принципом, сформульованим у класичній стратегічній теорії: дезорганізація системи противника може бути ефективнішою за її пряме фізичне знищення. Руйнування структури управління, сенсорних полів і каналів зв'язку здатне призвести до колапсу всієї бойової архітектури навіть за збереження значної частини матеріальних ресурсів [25, 30].

Отже, подібні операції мають значення не лише як приклади військового планування, але й як джерело емпіричного матеріалу для розвитку сучасної військової теорії. Вони дозволяють уточнювати моделі функціонування бойових систем, поглиблювати розуміння інформаційного виміру війни та вдосконалювати підходи до підготовки командного складу.

*3.6. Теоретична верифікація мережево-центричної переваги:* кореляція математичної моделі та бойової практики. Особливу наукову цінність для аналізу сучасних операцій прориву A2/AD становить зіставлення емпіричних результатів бойових дій із теоретичними моделями управління складними системами. У цьому контексті показовою є концептуальна відповідність між практичними наслідками досліджуваної операції та результатами дослідження Шовкошитного і Василенка, присвяченого ураженню нестационарних групових цілей [31].

У зазначеній роботі показано, що в умовах інформаційної невизначеності та динамічного середовища ієрархічні системи управління можуть демонструвати різке зниження ефективності після перевищення певного порогу інформаційного навантаження на вузли прийняття рішень. Ключовим фактором виступає не фізичне знищення елементів системи, а перевантаження каналів обробки даних, що призводить до втрати узгодженості між її складовими.

Аналіз емпіричних подій демонструє подібну закономірність. Під впливом радіоелектронних перешкод інтегрована система протиповітряної оборони перестає функціонувати як стабільна оборонна структура і переходить у режим нестійкої інформаційної системи. Радари працюють імпульсно, сигнали змінюють характеристики, канали зв'язку стають нестабільними, а операційна картина повітряної обстановки втрачає достовірність.

За таких умов система фактично набуває характеристик об'єкта, який у теоретичній моделі описується як нестационарна групова ціль. Це створює ситуацію, коли порушення інформаційних зв'язків між елементами системи призводить до її швидкої функціональної деградації.

Порівняльний аналіз дозволяє виявити структурну асиметрію протиборчих систем. Оборонна архітектура, побудована за ієрархічним

принципом, виявляється вразливою до інформаційного перевантаження, тоді як мережево-центрична система з розподіленим управлінням зберігає функціональність завдяки можливості перерозподілу ролей між вузлами.

Методологічно така відповідність має принципове значення. Вона свідчить про конвергенцію результатів, коли математичне моделювання та емпіричний аналіз бойових дій приводять до подібних висновків щодо закономірностей функціонування складних військових систем.

Отже, результати дослідження Шовкошитного та Василенко можна розглядати як теоретичну інтерпретацію механізмів деградації ієрархічних систем управління під впливом інформаційного перевантаження, тоді як розглянутий кейс демонструє можливу практичну реалізацію подібних процесів на операційному рівні.

3.7. *Методичні наслідки для підготовки офіцерів.* Аналіз сучасних операцій подолання систем А2/АD демонструє закономірність, яка має важливе значення для викладання оперативного мистецтва та теорії управління військами. Ефективність бойових систем визначається не лише технічними характеристиками озброєння, а насамперед архітектурою інформаційної взаємодії між елементами системи. Практика сучасних операцій узгоджується з висновками математичних моделей управління складними системами: після перевищення певного порогу інформаційного навантаження централізовані структури втрачають керованість швидше, ніж мережеві.

З педагогічної точки зору це означає необхідність зміщення акцентів підготовки офіцерів від платформи-орієнтованого мислення до системного розуміння бойового простору як інтегрованої мережі сенсорів, засобів управління та засобів впливу. Саме такий підхід дозволяє майбутнім командирам адекватно оцінювати характер сучасної війни та приймати рішення у умовах інформаційної нестабільності.

Таблиця №1

**Порівняльні характеристики ієрархічних та мережевих систем управління**

Критерій	Ієрархічна система управління	Мережева система управління
Архітектура	Централізована вертикаль	Розподілена мережа вузлів
Стійкість до втра	Критична залежність від вузлів управління	Висока живучість через резервування функцій
Швидкість реакції	Обмежена швидкістю передачі команд	Висока завдяки паралельній обробці
Адаптивність	Низька, зміни потребують централізованих рішень	Висока, вузли можуть перебирати функції
Вразливість до РЕБ	Висока – порушення зв'язку	Нижча – мережа перебудовується

	руйнує систему	
Масштабованість	Обмежена структурою	Практично необмежена
Поведінка в умовах невизначеності	Деградація управління	Самоорганізація системи
Тип переваги	Платформна	Архітектурна
Операційна логіка	Лінійна (kill chain)	Нелінійна (kill web / бойова мережа ураження)
Стратегічна ефективність	Залежить від чисельності сил	Залежить від якості інтеграції



Рисунок 1. Порівняльна схема моделей kill chain та kill web

Проміжний висновок розділу. Аналіз сучасних операцій прориву систем А2/АD демонструє якісну трансформацію характеру воєнної переваги. Вирішальним фактором стає не сама по собі вогнева міць або кількість платформ, а здатність сторони створювати, підтримувати та захищати інтегроване інформаційне середовище бойових дій. Перевага поступово переходить від окремих засобів ураження до архітектури їх взаємодії.

У таких умовах навіть технічно потужна оборонна система може втратити ефективність, якщо порушується її інформаційна цілісність або деградує швидкість прийняття рішень. Таким чином, сучасні конфлікти дедалі більше набувають характеру боротьби за контроль над інформаційним середовищем поля бою.

**4. Політико-стратегічні наслідки операцій прориву А2/АD**

Технічна картина подолання системи А2/АD – включаючи застосування фаз SEAD/DEAD, руйнування ланцюга ураження (kill chain) та перевагу мережевої архітектури над ієрархічною – набуває стратегічного значення лише тоді, коли вона інтегрована у політичну логіку операції та підпорядкована чітко визначеному кінцевому стану.

У військово-стратегічній теорії війна розглядається не як змагання масштабів руйнування, а як боротьба волі [22], у межах якої удари по критичних системах управління та символах влади спрямовані насамперед на зміну поведінки противника та підрив його здатності до організованого опору.

**4.1. Соціально-політичний вимір стратегії: боротьба волі.** Військово-операційний успіх має

стратегічну цінність лише тоді, коли він інтегрований у ширшу політичну логіку. Як наголошував Андре Бофр, війна є не змаганням руйнувань, а змаганням волі; саме здатність впливати на волю противника визначає результат конфлікту [22]. Ця класична теза підтверджується сучасною стратегічною аналітикою: військова стратегія спрямована на використання ресурсів так, щоб зменшити волю противника до опору та забезпечити досягнення політичних цілей.

У венесуельському кейсі ключовим чинником стала не лише деградація системи ППО, а психологічний ефект демонстрації вразливості центру влади. Дослідник цивільно-військових відносин Джон Полга-Хечимовіч зазначає [32], що стійкість режиму Мадуро значною мірою ґрунтувалася на механізмах так званого “захисту від переворотів” (coup-proofing). Такі механізми передбачають тісне переплетення політичних та військових еліт, унаслідок чого збройні сили стають інструментом підтримки режиму, а не автономним державним інститутом.

Аналітична стаття [33] попереджає, що навіть успішне усунення авторитарного лідера не гарантує демократичного результату: після падіння персоналістського режиму можуть зберігатися силові та клієнтельні мережі попереднього режиму, створюючи ризик “керованого авторитаризму”, а не інституційної трансформації.

Аналітик Майкл Шуркін [34] у своїх лекційних матеріалах з військової стратегії також наголошує, що військові операції мають сенс лише як елемент цілісної політичної стратегії, де дипломатичні, інформаційні й економічні інструменти є невід’ємними складовими стратегії поряд із військовими діями. Без цієї інтеграції навіть блискавичні перемоги не дають стійкого результату.

*4.2. Руйнування ілюзії безпеки як стратегічний ефект.* У випадку досліджуваної операції ключовим результатом стало не лише ураження сенсорних елементів ППО, а підлив базового припущення керівництва режиму щодо захищеності центру влади. Це означає руйнування психологічного базису системи стримування. Коли система оборони перестає гарантувати безпеку столиці або стратегічних активів, політична структура режиму може почати втрачати стійкість навіть за наявності значного залишкового військового потенціалу.

Це підтверджує тезу стратегічної теорії: вирішальним є не фізичне знищення сил, а психологічний перелом у противника, який змушує його відмовитися від продовження боротьби [22].

*4.3. Соціально-економічна мотивація військових еліт.* Аналіз поведінки військового керівництва свідчить, що стійкість режиму значною мірою залежить від характеру мотивації офіцерського корпусу. Якщо лояльність базується не на ідеологічних переконаннях чи національній ідентичності, а на доступі до економічних

ресурсів, то втрата гарантій їх збереження може швидко зруйнувати готовність до опору [32].

У такій ситуації технологічна перевага противника виступає каталізатором політичної дестабілізації, але не його першопричиною. Вона лише активує внутрішні слабкості системи.

*4.4. Пастка післяопераційної стабілізації.* Операційний успіх не тотожний стратегічній перемозі. Усунення політичного керівництва режиму не означає автоматичного демонтажу його інституційної структури. Апарат безпеки, економічні мережі, адміністративна вертикаль і зовнішні союзники можуть зберегтися та трансформуватися в нову форму керованої авторитарності [32].

Це створює стратегічну пастку: швидка військова перемога здатна породити довготривалу нестабільність, якщо не забезпечено політичні, дипломатичні та інституційні умови для стабілізації після завершення операції.

*4.5. Узагальнення стратегічного рівня.* Проведений аналіз дозволяє сформулювати такі стратегічні закономірності:

- технологічна перевага виступає інструментом реалізації стратегії, а не самодостатньою умовою перемоги;
- швидкість військової фази має стратегічний сенс лише за наявності чіткої політичної мети та плану післяопераційної стабілізації;
- легітимність результату важливіша за масштаб ураження;
- внутрішня мотивація суспільства та еліт визначає довгострокову стійкість результатів операції.

У цьому контексті сучасні операції прориву A2/AD слід розглядати не лише як технологічний або оперативний феномен, а як інтегроване стратегічне явище, де військові дії, інформаційний вплив і політична логіка становлять єдину систему.

*4.6. Порівняльний контекст: технологія проти волі.* Порівняння з досвідом сучасних воєнних конфліктів демонструє принципову закономірність: технологічна перевага не гарантує перемоги, якщо противник має високу мотивацію до опору. Навпаки, навіть обмежені матеріальні ресурси можуть частково компенсуватися високим рівнем суспільної консолідації та екзистенційною мотивацією до опору.

Водночас планування подібних операцій потребує врахування внутрішньополітичної структури противника. Історичний досвід демонструє, що навіть технологічно успішні військові кампанії можуть призводити до стратегічної нестабільності, якщо не враховано характер суспільної підтримки режиму, конфігурацію еліт та потенціал внутрішньої консолідації. У таких умовах військовий успіх не гарантує формування стабільного політичного порядку після завершення бойових дій.

Отже, справжня стратегічна “зона заборони доступу” може формуватися не лише системами озброєння, а й моральною стійкістю суспільства та

його готовністю до тривалого опору.

Таким чином, системи A2/AD мають подвійну природу. З одного боку, вони є сукупністю технічних засобів оборони, а з іншого – інструментом стратегічного стримування, який впливає на процес прийняття рішень противником. Руйнування інформаційної цілісності такої системи підриває не лише її технічні можливості, а й психологічний ефект стримування, що значно прискорює деградацію всієї оборонної архітектури.

Проведений політико-стратегічний аналіз свідчить, що сучасні операції прориву A2/AD є інструментом досягнення політичних результатів, а не самоціллю. Їхня ефективність визначається здатністю інтегрувати військові дії в ширшу систему стратегічного впливу – дипломатичного, інформаційного та економічного. Саме ця інтеграція перетворює тактичний успіх на довгострокову стратегічну перевагу.

### Обговорення

Отримані результати дослідження свідчать про системну трансформацію характеру сучасних операцій прориву A2/AD. Аналіз кейсу показав, що вирішальним фактором успіху є не кількісна перевага у засобах ураження, а рівень інтеграції сенсорних, інформаційних та ударних компонентів у єдину мережеву архітектуру управління.

Проведене дослідження дозволило встановити такі закономірності:

1. Деградація ієрархічної системи ППО відбувається передусім через інформаційне перевантаження її вузлів управління.

2. Порушення цілісності сенсорного поля призводить до втрати ситуаційної обізнаності швидше, ніж фізичне знищення окремих елементів системи.

3. Мережева архітектура забезпечує суттєве прискорення циклу прийняття рішень, що формує асиметричну перевагу навіть за обмежених ресурсів.

Таким чином, результати підтверджують гіпотезу про пріоритет інформаційної інтеграції над платформенною перевагою.

Отримані висновки узгоджуються з:

- теорією мережевоцентричних операцій [11],
- концепцією боротьби волі [22],
- принципом непрямого підходу [26],
- положеннями сучасних доктрин [6],
- математичними моделями управління в умовах інформаційної невизначеності [31].

Особливо важливою є кореляція між теоретичними розрахунками українських авторів щодо деградації управління при перевищенні порогу інформаційного шуму та емпіричними даними сучасних операцій. Це свідчить про універсальність виявлених закономірностей.

Наукова новизна дослідження полягає у:

- інтеграції технічного аналізу операції з політико-стратегічним виміром;
- поєднанні концепції SEAD/DEAD з теорією руйнування волі противника;

• інтерпретації A2/AD як інформаційної системи, а не лише сукупності ракетних платформ;

• формулюванні критерію сучасної стратегічної ефективності через зміну раціональності війни для противника.

У роботі здійснено спробу інтегрувати операційно-технічний аналіз із політико-стратегічною інтерпретацією, що дозволяє розглядати A2/AD як інформаційну систему, а не лише як сукупність озброєнь.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх використання в системі професійної підготовки військових фахівців, зокрема при викладанні дисциплін, пов'язаних із теорією сучасних операцій, організацією управління військами та протидією інтегрованим системам протиповітряної оборони. Запропонований підхід до інтерпретації A2/AD як інформаційно-керуючої системи може бути застосований під час розроблення навчальних програм, тренувальних сценаріїв і штабних моделювань. Результати дослідження також можуть бути враховані у процесі вдосконалення архітектур систем управління та під час формування вимог до стійкості бойових мереж в умовах інформаційного впливу та радіоелектронної боротьби. Крім того, зроблені висновки можуть бути використані при розробленні методичних рекомендацій щодо підвищення адаптивності підрозділів у багатодоменному середовищі та при оцінці ефективності мережевих рішень у сучасних конфліктах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на поглиблене вивчення механізмів інтеграції мережево-центричних систем управління у багатодоменних операціях, а також на аналіз стійкості ієрархічних оборонних структур в умовах інформаційного перевантаження та радіоелектронного впливу. Особливу увагу варто приділити емпіричній перевірці моделей деградації систем управління при перевищенні порогових значень інформаційного шуму, що дозволить уточнити математичні залежності між щільністю сигналів, пропускну здатністю каналів і швидкістю прийняття рішень. Перспективним напрямом є також порівняльний аналіз різних архітектур бойових мереж з метою визначення оптимального співвідношення централізації та децентралізації управління. Окремого вивчення потребує взаємозв'язок між технологічною інтеграцією систем і психологічною стійкістю військових структур, оскільки сучасні операції демонструють, що інформаційна дезорганізація може мати стратегічні наслідки навіть без масштабного фізичного ураження. Результати таких досліджень можуть бути використані як у військово-теоретичній площині, так і в практиці підготовки командного складу та розроблення нових доктринальних підходів.

Проведене дослідження підтверджує, що сучасні операції прориву систем A2/AD є не лише технологічним явищем, а комплексним стратегічним процесом, у якому інформаційна

інтеграція, мережеве управління та політична логіка становлять єдину систему. Саме ця інтеграція визначає характер і результат сучасних воєнних конфліктів.

### **Висновки**

Проведений аналіз демонструє, що сучасні операції прориву систем A2/AD відображають глибинну трансформацію характеру війни. Якщо в індустріальну епоху вирішальним фактором виступала маса вогневих засобів і технічна перевага платформ, то в умовах цифровізованого поля бою визначальним стає рівень інтеграції сенсорів, засобів управління, ударних систем та аналітичних алгоритмів у єдину мережеву архітектуру.

Досліджений кейс підтверджує кілька фундаментальних закономірностей сучасного воєнного мистецтва.

По-перше, інформаційне домінування здатне нейтралізувати навіть технологічно розвинуту систему оборони. Руйнування сенсорного поля, порушення передачі даних та дезорганізація управління призводять до втрати боєздатності швидше, ніж фізичне знищення озброєння. У цьому сенсі системи A2/AD доцільно розглядати не лише як сукупність ракетних і радіолокаційних платформ, а передусім як інформаційно-керуючі системи, стійкість яких визначається цілісністю мережі сенсорів, каналів зв'язку та центрів прийняття рішень.

По-друге, мережева архітектура бойових систем демонструє стійкість, принципово недосягну для ієрархічних структур. У розподіленій мережі знищення окремих вузлів не руйнує функціональну цілісність системи, тоді як централізовані системи управління зазнають каскадної деградації після втрати ключових елементів. Саме ця структурна різниця пояснює ефективність сучасних концепцій бойових мереж (kill web) у протистоянні традиційним ієрархічним архітектурам (kill chain).

По-третє, швидкість інтеграції систем стає важливішою за їхню кількість або індивідуальні характеристики. Перевагу отримує сторона, здатна швидше об'єднати розвідку, управління та ураження в єдиний інформаційний цикл, скорочуючи час від виявлення до удару. У такій логіці ключовим фактором виступає не лише технологія озброєння, а здатність системи підтримувати безперервність циклу спостереження, орієнтації, рішення та дії (OODA).

По-четверте, результати дослідження свідчать про структурну асиметрію між мережевими системами наступу та оборони. Розподілені мережі сенсорів і платформ наступальної сторони здатні масштабуватися та адаптуватися швидше, ніж інтегровані оборонні архітектури, які потребують централізованого управління та стабільної інформаційної інфраструктури. Унаслідок цього мережеві системи наступу демонструють вищу еволюційну гнучкість, що поступово знижує ефективність традиційних A2/AD-архітектур.

По-п'яте, сучасні операції мають нерозривний військово-політичний характер. Військовий успіх набуває стратегічного значення лише тоді, коли він

синхронізований із політичною метою, дипломатичною підготовкою та інформаційною стратегією. Без цієї інтеграції навіть технічно бездоганна операція може не привести до бажаного результату.

По-шосте, розвиток концепції A2/AD має чітко виражений асиметричний характер. Історично вона формується передусім у державах, які поступаються потенційному противнику у можливостях глобальної проєкції сили, але прагнуть обмежити його свободу дій у власному регіоні. У таких умовах системи протиповітряної оборони, протикорабельні ракети, засоби радіоелектронної боротьби та мережеві сенсорні комплекси використовуються для створення так званих "зон заборони доступу", що підвищують ризик і вартість військового втручання для сильнішої сторони. Саме тому концепція A2/AD найбільш активно розвивається державами, які прагнуть компенсувати асиметрію сил шляхом підвищення оборонної стійкості у визначених географічних регіонах.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному поєднанні трьох рівнів аналізу, які традиційно розглядаються окремо:

1. Доктринального рівня – систематизації еволюції концепції A2/AD та механізмів її подолання.
2. Операційного рівня – реконструкції логіки сучасної інтегрованої операції із застосуванням мережево-центричних систем.
3. Стратегічного рівня – оцінки політичних наслідків технологічного домінування.

На відміну від більшості робіт, що розглядають A2/AD переважно як технічну або тактичну проблему, дана стаття демонструє, що її подолання є насамперед системною задачею управління інформаційним середовищем бою.

Отримані результати можуть бути використані:

- у навчальному процесі військових навчальних закладів;
- при підготовці доктринальних документів;
- у плануванні операцій протидії інтегрованим системам ППО;
- у дослідженнях розвитку мережево-центричних концепцій ведення війни.

Таким чином, сучасна війна дедалі більше набуває характеру боротьби за контроль над інформаційною реальністю поля бою. Стратегічна перевага майбутнього визначатиметься не кількістю озброєнь як такою, а здатністю держави створювати інтегровані мережеві системи управління бойовими діями та підтримувати їхню інформаційну цілісність у багатодоменному середовищі.

### **Список використаних джерел**

- [1.] A. Krepinevich, B. Watts, and R. Work, Meeting the Anti-Access and Area-Denial Challenge. Washington, DC, USA: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2003. [Online]. Available: <https://csbaonline.org/uploads/documents/2003.05.20-Anti-Access-Area-Denial-A2-AD.pdf>
- [2.] K. Dobija, "The political and military aspects of creating anti-access/area-denial systems," Safety & Defense, 2021, Available: <https://doi.org/10.37105/sd.143>.

- [3.] M. van Creveld, *The Transformation of War*. New York, NY, USA: Free Press, 1991.
- [4.] S. M. I. Imam and S. Ullah, "Anti-access area denial capabilities: Implications for strategic stability," *Journal of Security & Strategic Analyses*, 2020, Available: <https://thesvi.org/wp-content/uploads/2020/09/JSSA-Vol-VI-no-1-17-42.pdf>
- [5.] E. V. Larson et al., *Assuring Access in Key Strategic Regions: Toward a Long-Term Strategy*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2004.
- [6.] D. Barrie, "Anti-access/area denial: Bursting the 'no-go' bubble?," *International Institute for Strategic Studies*, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://www.iiss.org/online-analysis/military-balance/2019/04/anti-access-area-denial-russia-and-crimea/>
- [7.] J. M. Richardson, "Design for maintaining maritime superiority," *Naval War College Review*, vol. 69, no. 2, Art. no. 4, 2016. [Online]. Available: <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=nwc-review>
- [8.] B. S. Lambeth, *The Transformation of American Air Power*. Ithaca, NY, USA: Cornell University Press, 2000.
- [9.] U.S. Department of Defense, "Joint Publication 3-01: Countering Air and Missile Threats," 2018. [Online]. Available: <https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/wp-content/uploads/2018/02/JointDoctrine-CounteringAirandMissileThreats.pdf>
- [10.] D. S. Alberts and R. E. Hayes, *Power to the Edge: Command and Control in the Information Age*. Washington, DC, USA: CCRP, 2003.
- [11.] B. S. Lambeth, *NATO's Air War for Kosovo: A Strategic and Operational Assessment*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2001. [Online]. Available: [https://www.rand.org/pubs/monograph\\_reports/MR1365.html](https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1365.html)
- [12.] "Why did Venezuela's air defense fail in US' Caracas raid?," *Army Technology*. [Online]. Available: <https://www.army-technology.com/features/why-did-venezuelas-air-defence-fail-in-us-caracas-raid/>
- [13.] J. A. López Díaz, "La caída del régimen en Venezuela: El concepto Anti-Acceso / Denegación de Área (A2AD) es sólo un acrónimo y no es invulnerable," *Asociación Española de Militares Escritores*, Jan. 8, 2026. [Online]. Available: <https://militaresescritores.es/noticias/la-caida-del-regimen-en-venezuela-el-concepto-anti-acceso-denegacion-de-area-a2ad-es-solo-un-acronimo-y-no-es-invulnerable-coronel-de-im-lopez-diaz/>
- [14.] G. Dubois, "Cómo el dominio aéreo de EE. UU. desmanteló la defensa antiaérea venezolana para capturar a Nicolás Maduro," *Aviacionline*. [Online]. Available: [https://www.aviacionline.com/espanol/defensa/como-el-dominio-aereo-de-ee-uu-desmantelo-la-defensa-antiaerea-venezolana-para-capturar-a-nicolas-maduro\\_a6959c8a97a89b44e006d9698/](https://www.aviacionline.com/espanol/defensa/como-el-dominio-aereo-de-ee-uu-desmantelo-la-defensa-antiaerea-venezolana-para-capturar-a-nicolas-maduro_a6959c8a97a89b44e006d9698/)
- [15.] B. Jensen, "Operational Art in the Age of Battle Networks," *Center for Strategic and International Studies (CSIS)*. [Online]. Available: <https://www.csis.org/analysis/chapter-4-operational-art-age-battle-networks/>
- [16.] C. Gordon and G. Hadley, "Military Operations: Airpower and Absolute Resolve," *Air & Space Forces Magazine*. [Online]. Available: <https://www.airandspaceforces.com/article/military-operations-airpower-and-absolute-resolve/>
- [17.] "RQ-170 Sentinel," *Air & Space Forces Magazine*. [Online]. Available: <https://www.airandspaceforces.com/weapons/rq-170/>
- [18.] "What to Know About the RQ-170 Drone, Venezuela, and Stealthy ISR," *Air & Space Forces Magazine*. [Online]. Available: <https://www.airandspaceforces.com/what-to-know-rq-170-drone-venezuela-stealthy-isr/>
- [19.] "Anduril's Lattice: a trusted dual use – commercial and military – platform for public safety, security, and defense," *Anduril*. [Online]. Available: <https://www.anduril.com/news/anduril-s-lattice-a-trusted-dual-use-commercial-and-military-platform-for-public-safety-security/>
- [20.] "Army Selects Anduril's Lattice for IBCS-M Program," *ExecutiveBiz*. [Online]. Available: <https://www.executivebiz.com/articles/army-anduril-lattice-ibcs-m-program/>
- [21.] A. Beaufre, *Introduction à la stratégie*. Paris, France: Armand Colin, 1963. [Online]. Available: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3328314d>
- [22.] "What US aircraft were used in Operation Absolute Resolve?," *Army Technology*. [Online]. Available: <https://www.army-technology.com/features/what-us-aircraft-were-used-in-operation-absolute-resolve/>
- [23.] J. R. Boyd, *A Discourse on Winning and Losing*, G. T. Hammond, Ed. Maxwell AFB, AL, USA: Air University Press, 2018. [Online]. Available: [https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B\\_0151\\_Boyd\\_Discourse\\_Winning\\_Losing.pdf](https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B_0151_Boyd_Discourse_Winning_Losing.pdf)
- [24.] E. G. Fillman, "Suppression of Enemy Air Defenses (SEAD) Battle Tracking Challenges in Contested Environments," *ALSSA*. [Online]. Available: <https://www.alssa.mil/News/Article/2543194/suppression-of-enemy-air-defenses-sead-battle-tracking-challenges-in-contested/>
- [25.] B. H. Liddell Hart, *Strategy*. London, U.K.: Faber & Faber, 1967.
- [26.] M. Shurkin et al., *French Army Approaches to Networked Warfare*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2022. [Online]. Available: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_reports/RR2900/RR2946/RAND\\_RR2946.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR2900/RR2946/RAND_RR2946.pdf)
- [27.] A. Martinez et al., "Simulating autonomous drone behaviors in an A2AD environment," *Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2024, Available: <https://doi.org/10.1177/15485129241288236>
- [28.] S. Markiewicz and M. Wrzosek, "Required operational capabilities of the recognition subsystem in the A2/AD system," *Safety & Defense*, 2023, Available: <https://doi.org/10.37105/sd.193>
- [29.] N. Świętochowski and D. Rewak, "The role of artillery in combating A2/AD systems," *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, 2021, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.9797>
- [30.] І. І. Шовкошитний та О. А. Василенко, "Математична модель застосування рою ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту," *Повітряна міць України*, no. 2(9), pp. 48-56, 2025. [Online]. Available: <https://sap.nuou.org.ua/article/view/343255>
- [31.] J. Polga-Hecimovich and K. Anderson, "Assessing the capabilities of Venezuela's military and armed groups," *War on the Rocks*. [Online]. Available: <https://warontherocks.com/episode/the-insider/42610/assessing-the-capabilities-of-venezuelas-military-and-armed-groups/>
- [32.] O. J. Pérez, "After Maduro: Trump's Managed Authoritarianism Trap in Venezuela," *War on the Rocks*, Jan. 2026. [Online]. Available: <https://warontherocks.com/2026/01/after-maduro-trumps-managed-authoritarianism-trap-in-venezuela/>
- [33.] M. Shurkin, "Thoughts on Military Strategy and War with Venezuela," *Pax Americana*, YouTube lecture. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=mW-L5XPLJwQ>

**Ibragim Gabidulin** (Candidate Technical Science, Associate Professor)

<https://orcid.org/0009-0009-7860-7818>

Center for Army, Conversion and Disarmament Studies

## GENESIS AND EVOLUTION OF A2/AD CONCEPTS: FROM DETERMINISTIC SYSTEMS TO NETWORK-CENTRIC WARFARE

*This article examines the evolution of the Anti-Access/Area Denial (A2/AD) concept and the mechanisms for overcoming it in contemporary multi-domain operations. Based on an interdisciplinary analysis of military doctrines, the theory of network-centric warfare, and recent operational case studies, the study demonstrates that the decisive factor of success is not the number of platforms or firepower, but the level of integration of sensors, command-and-control assets, and strike systems within a unified information-operational architecture.*

*The research shows that disrupting the informational integrity of an air defense system may be more effective than its physical destruction. The paper also substantiates the relationship between theoretical models of command and control under conditions of informational uncertainty and the practical outcomes of modern military operations.*

*It is concluded that future conflicts will increasingly be determined by the ability of opposing sides to manage the information environment and accelerate decision-making cycles, while technological superiority serves primarily as an instrument for implementing political strategy.*

*The findings of the study may contribute to the development of military doctrine, operational planning, and professional military education related to countering integrated air defense systems and A2/AD architectures.*

**Keywords:** A2/AD, SEAD, DEAD, network-centric warfare, kill web, information dominance, command and control systems, multi-domain operations, air defense, battle networks, modern military strategy.

### References

- [1.] A. Krepinevich, B. Watts, and R. Work, Meeting the Anti-Access and Area-Denial Challenge. Washington, DC, USA: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2003. [Online]. Available: <https://csbaonline.org/uploads/documents/2003.05.20-Anti-Access-Area-Denial-A2-AD.pdf>
- [2.] K. Dobija, "The political and military aspects of creating anti-access/area-denial systems," Safety & Defense, 2021, Available: <https://doi.org/10.37105/sd.143>.
- [3.] M. van Creveld, The Transformation of War. New York, NY, USA: Free Press, 1991.
- [4.] S. M. I. Imam and S. Ullah, "Anti-access area denial capabilities: Implications for strategic stability," Journal of Security & Strategic Analyses, 2020, Available: <https://thesvi.org/wp-content/uploads/2020/09/JSSA-Vol-VI-no-1-17-42.pdf>
- [5.] E. V. Larson et al., Assuring Access in Key Strategic Regions: Toward a Long-Term Strategy. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2004.
- [6.] D. Barrie, "Anti-access/area denial: Bursting the 'no-go' bubble?," International Institute for Strategic Studies, Apr. 2019. [Online]. Available: <https://www.iiss.org/online-analysis/military-balance/2019/04/anti-access-area-denial-russia-and-crimea/>
- [7.] J. M. Richardson, "Design for maintaining maritime superiority," Naval War College Review, vol. 69, no. 2, Art. no. 4, 2016. [Online]. Available: <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=nwc-review>
- [8.] B. S. Lambeth, The Transformation of American Air Power. Ithaca, NY, USA: Cornell University Press, 2000.
- [9.] U.S. Department of Defense, "Joint Publication 3-01: Countering Air and Missile Threats," 2018. [Online]. Available: <https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/wp-content/uploads/2018/02/JointDoctrine-CounteringAirandMissileThreats.pdf>
- [10.] D. S. Alberts and R. E. Hayes, Power to the Edge: Command and Control in the Information Age. Washington, DC, USA: CCRP, 2003.
- [11.] B. S. Lambeth, NATO's Air War for Kosovo: A Strategic and Operational Assessment. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2001. [Online]. Available: [https://www.rand.org/pubs/monograph\\_reports/MRI365.html](https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MRI365.html)
- [12.] "Why did Venezuela's air defense fail in US' Caracas raid?," Army Technology. [Online]. Available: <https://www.army-technology.com/features/why-did-venezuelas-air-defence-fail-in-us-caracas-raid/>
- [13.] J. A. López Díaz, "La caída del régimen en Venezuela: El concepto Anti-Acceso / Denegación de Área (A2AD) es sólo un acrónimo y no es invulnerable," Asociación Española de Militares Escritores, Jan. 8, 2026. [Online]. Available: <https://militaresescritores.es/noticias/la-caida-del-regimen-en-venezuela-el-concepto-anti-acceso-denegacion-de-area-a2ad-es-solo-un-acronimo-y-no-es-invulnerable-coronel-de-im-lopez-diaz/>
- [14.] G. Dubois, "Cómo el dominio aéreo de EE. UU. desmanteló la defensa antiaérea venezolana para capturar a Nicolás Maduro," Aviacionline. [Online]. Available: [https://www.aviacionline.com/espanol/defensa/como-el-dominio-aereo-de-ee-uu-desmantelo-la-defensa-antiaerea-venezolana-para-capturar-a-nicolas-maduro\\_a6959c8a97a89b44e006d9698/](https://www.aviacionline.com/espanol/defensa/como-el-dominio-aereo-de-ee-uu-desmantelo-la-defensa-antiaerea-venezolana-para-capturar-a-nicolas-maduro_a6959c8a97a89b44e006d9698/)
- [15.] B. Jensen, "Operational Art in the Age of Battle Networks," Center for Strategic and International Studies (CSIS). [Online]. Available: <https://www.csis.org/analysis/chapter-4-operational-art-age-battle-networks/>
- [16.] C. Gordon and G. Hadley, "Military Operations: Airpower and Absolute Resolve," Air & Space Forces Magazine. [Online]. Available: <https://www.airandspaceforces.com/article/military-operations-airpower-and-absolute-resolve/>
- [17.] "RQ-170 Sentinel," Air & Space Forces Magazine. [Online]. Available: <https://www.airandspaceforces.com/weapons/rq-170/>
- [18.] "What to Know About the RQ-170 Drone, Venezuela, and Stealthy ISR," Air & Space Forces Magazine. [Online]. Available: <https://www.airandspaceforces.com/what-to-know-rq-170-drone-venezuela-stealthy-isr/>
- [19.] "Anduril's Lattice: a trusted dual use – commercial and

- military – platform for public safety, security, and defense," Anduril. [Online]. Available: <https://www.anduril.com/news/anduril-s-lattice-a-trusted-dual-use-commercial-and-military-platform-for-public-safety-security/>
- [20.] "Army Selects Anduril's Lattice for IBCS-M Program," ExecutiveBiz. [Online]. Available: <https://www.executivebiz.com/articles/army-anduril-lattice-ibcs-m-program/>
- [21.] A. Beaufre, Introduction à la stratégie. Paris, France: Armand Colin, 1963. [Online]. Available: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3328314d>
- [22.] "What US aircraft were used in Operation Absolute Resolve?," Army Technology. [Online]. Available: <https://www.army-technology.com/features/what-us-aircraft-were-used-in-operation-absolute-resolve/>
- [23.] J. R. Boyd, A Discourse on Winning and Losing, G. T. Hammond, Ed. Maxwell AFB, AL, USA: Air University Press, 2018. [Online]. Available: [https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B\\_0151\\_Boyd\\_Discourse\\_Winning\\_Losing.pdf](https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B_0151_Boyd_Discourse_Winning_Losing.pdf)
- [24.] E. G. Fillman, "Suppression of Enemy Air Defenses (SEAD) Battle Tracking Challenges in Contested Environments," ALSSA. [Online]. Available: <https://www.alssa.mil/News/Article/2543194/suppression-of-enemy-air-defenses-sead-battle-tracking-challenges-in-contested/>
- [25.] B. H. Liddell Hart, Strategy. London, U.K.: Faber & Faber, 1967.
- [26.] M. Shurkin et al., French Army Approaches to Networked Warfare. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2022. [Online]. Available: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_reports/RR2900/RR2946/RAND\\_RR2946.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR2900/RR2946/RAND_RR2946.pdf)
- [27.] A. Martinez et al., "Simulating autonomous drone behaviors in an A2AD environment," Journal of Defense Modeling and Simulation, 2024, Available: <https://doi.org/10.1177/15485129241288236>.
- [28.] S. Markiewicz and M. Wrzosek, "Required operational capabilities of the recognition subsystem in the A2/AD system," Safety & Defense, 2023, Available: <https://doi.org/10.37105/sd.193>.
- [29.] N. Świętochowski and D. Rewak, "The role of artillery in combating A2/AD systems," Scientific Journal of the Military University of Land Forces, 2021, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.9797>.
- [30.] I. Shovkoshytnyi and O. Vasylenko, "Mathematical model of the use of a swarm of strike unmanned aerial vehicles to engage non-stationary group targets using elements of artificial intelligence," Air Power of Ukraine, no. 2(9), pp. 48-56, 2025. [Online]. Available: <https://sap.nuou.org.ua/article/view/343255>
- [31.] J. Polga-Hecimovich and K. Anderson, "Assessing the capabilities of Venezuela's military and armed groups," War on the Rocks. [Online]. Available: <https://warontherocks.com/episode/the-insider/42610/assessing-the-capabilities-of-venezuelas-military-and-armed-groups/>
- [32.] O. J. Pérez, "After Maduro: Trump's Managed Authoritarianism Trap in Venezuela," War on the Rocks, Jan. 2026. [Online]. Available: <https://warontherocks.com/2026/01/after-maduro-trumps-managed-authoritarianism-trap-in-venezuela/>
- [33.] M. Shurkin, "Thoughts on Military Strategy and War with Venezuela," Pax Americana, YouTube lecture. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=mWL5XPLJwQ>

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-20-27

УДК 355.4:358.4

<sup>1</sup>Блискун Олександр Євгенійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0009-0009-7751-8313>

<sup>2</sup>Авраменко Олександр Васильович (доктор технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-1358-1185>

<sup>3</sup>Ярошенко Антоніна Сергіївна

<https://orcid.org/0009-0004-4987-8620>

<sup>2</sup>Мартинюк Олексій Ростиславович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2578-0018>

<sup>1</sup>Головне управління розвитку спроможностей авіації, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України, Київ, Україна

<sup>3</sup>Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 22.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 30.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## МУЛЬТИДОМЕННА КОНЦЕПЦІЯ УДАРНИХ ДІЙ ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ

Стрімка трансформація поля бою та масове застосування безпілотних авіаційних систем вимагають концептуальної адаптації Повітряних Сил Збройних Сил України до мультидоменних операцій. На основі аналізу доктринальної бази НАТО і досвіду російсько-української війни у статті сформовано концепцію ударних дій повітряної компоненти у багатовимірному середовищі. У ході дослідження розроблено архітектуру модульної розвідувально-ударної групи для реалізації комплексного вогневого ураження. Доведено, що критичною умовою ефективності застосування є автономність системи в умовах ворожої радіоелектронної протидії. Отримані результати дають змогу військовим фахівцям здійснювати планування розвитку Повітряних Сил та перспективних систем мультидоменного управління.

**Ключові слова:** мультидоменні операції; ударні дії; протиповітряна оборона; безпілотні системи; безпілотні авіаційні комплекси; безпілотні літальні апарати; планування; комплексне вогневе ураження; ефективність, автономність систем.

### Вступ

Сучасна парадигма ведення збройної боротьби зазнає фундаментальних змін, переходячи від концепції Joint Operations до багатовимірних Multi-Domain Operations (MDO). Відповідно до нової концепції НАТО, затвердженої у 2023 році, MDO визначається як “синхронізація” військової діяльності в усіх доменах (повітряному, наземному, морському, космічному та кібернетичному) з невійськовими інструментами влади для створення конвергентних ефектів [1].

Досвід війни в Україні показує явище “дронізації”, яке французькі аналітики (IFRI) розглядають як можливу військову революцію, у межах якої безпілотники створюють нову “роботизовану нервову систему” поля бою [2]. В умовах, коли противник застосовує комбіновані удари із залученням крилатих, балістичних (включно з ракетами типу KN-23), аеробалістичних ракет та масованих атак БпЛА типу “Shahed” [3-7] виникає нагальна потреба у трансформації тактики та оперативного мистецтва застосування авіації. Актуальність роботи зумовлена необхідністю інтеграції різномірних авіаційних засобів – від пілотованої авіації з західним озброєнням (АЗУ типу JDAM-ER, AASM Hammer) до FPV-дронів і систем радіоелектронної боротьби РЕБ – у єдиний розвідувально-ударний контур [3-6].

Проблематика еволюції форм застосування

авіації у мультидоменному середовищі широко висвітлена у західній та вітчизняній літературі. Доктринальні засади НАТО визначають повітряну міць як критичний елемент, що забезпечує проєкцію сили та підтримку інших компонентів, однак визнають необхідність тіснішої координації в рамках MDO [8-11]. Дослідники об’єднаного центру компетенцій з повітряної потужності (JAPCC) наголошують, що перехід до MDO вимагає не просто додавання нових доменів, а зміни ментальності планування та впровадження систем крос-доменного командування (CDC) [12, 13]. Водночас аналіз Д. Елісона і Т. Свейста застерігає від надмірної віри в технології та нечіткість концепцій MDO, наголошуючи на ризиках надмірної залежності від зв’язку в умовах активної протидії ворожих засобів РЕБ, що особливо актуально для українського театру бойових дій. [14]. Вітчизняні науковці, зокрема С. Дроздов, В. Тюрін, В. Злакоман та В. Гордійчук, заклали фундамент розуміння операційного середовища та технологічних аспектів автоматизації управління (АСУ “Дзвін”, “Ореанда-ПС”), підкреслюючи роль інформаційної переваги [7, 15]. Проте, існуючі дослідження недостатньо розкривають механізми практичної інтеграції безпілотної авіації та тактичної авіації в єдину систему вогневого ураження в умовах відсутності стійкого панування в повітрі.

**Метою статті** є розробка та обґрунтування мультидоменної концепції ударних дій повітряної компоненти, що базується на синергії пілотованої та безпілотної авіації та засобів високоточного ураження в умовах насиченої протиповітряної оборони (ППО) противника.

### Матеріали та методи

Для розробки мультидоменної концепції ударних дій повітряної компоненти застосовано комплексний методологічний підхід, що поєднує теоретичний аналіз західних доктринальних моделей з емпіричним дослідженням бойових дій високої інтенсивності в Україні. Процес формування авторської концепції реалізовано через чотири взаємопов'язані етапи.

1. Критичний аналіз концептуального апарату MDO. На першому етапі, використовуючи методи порівняльного аналізу та синтезу, було досліджено еволюцію концепції MDO в країнах НАТО, з їх допомогою проаналізовано базові документи армії США (FM 3-0 Operations) та Великої Британії (JCN 1/20 Multi-Domain Integration), які визначають MDO як “синхронізацію” військової діяльності в усіх доменах для створення конвергентних ефектів [7, 16, 17]. Враховано зазначені у вище перерахованих документах застереження західних аналітиків щодо вразливості комунікаційних мереж та ризиків перевантаження командирів в умовах нестабільного зв'язку, що є характерним для театру бойових дій в Україні [18, 19]. Це дало змогу уникнути обрання західних підходів і пристосувати поняття “вікон можливостей” до умов обмежених ресурсів. [16, 18].

2. Емпіричний аналіз бойового досвіду (січень–серпень 2024 р.). Використовуючи методи статистичного аналізу та узагальнення, опрацьовано масиви даних з офіційних “Военно-історичних описів російсько-української війни” [3-6].

Об'єктами аналізу була статистика понад 3000 авіаційних ударів противника, динаміка застосування керованих авіабомб (КАБ з УМПК) та ефективність української ешелюваної системи ППО проти комбінованих ударів таких засобів ураження Х-101, Іскандер-К, “Кинджал”, “Циркон”, Іскандер-М, КН-23 [3-6]. Також проаналізовано операції зі знищення літаків А-50 та Іл-22, удари по аеродромах базування стратегічної авіації РФ (“Олень”, “Енгельс”), а також ефективність застосування різних зразків озброєння (Storm Shadow/Scalp, AASM-250 Hammer) у комплексі з діями БпЛА [3-6].

3. Техніко-технологічний синтез і моделювання. Застосовано метод системного моделювання для інтеграції різномірних засобів ураження в єдиний контур. Спираючись на дослідження В. Туре, визначено роль FPV-дронів та розвідувальних БпЛА, як елементів “комплексного вогневого ураження”, що компенсують нестачу в артилерії та авіації [2]. Досліджено тактико-технічні характеристики (ТТХ) плануючих бомб JDAM-ER та AASM-250 Hammer у порівнянні з російськими УМПК, а також особливості їх застосування з кадрування для мінімізації ризиків від ППО [3-6]. Оцінено роль автоматизованих систем управління (“Дзвін АС”, ІС “Delta”) та перспективи впровадження систем

багатоомного командування та управління (MDC2) для скорочення циклу прийняття рішень [2, 7, 20].

4. Сценарне моделювання. На основі аналізу тенденцій (зростання ролі засобів РЕБ, масоване використання макетів та хибних цілей) змодельовано алгоритми дій змішаних тактичних ударних груп в умовах втрати зв'язку та GPS-навігації, що відповідає вимогам до ведення бойових дій в умовах активної протидії засобів РЕБ противника [3-6, 21].

Інформаційну основу дослідження склали:

публікації JAPCC щодо адаптації MDO та концепції заборони доступу та блокування зони (Anti-Access/Area Denial – A2/AD) [22, 23], доктрини НАТО [8-11] та концепції розвитку Повітряних Сил ЗСУ [14];

зведення Генерального штабу ЗСУ, звіти Центру досліджень воєнної історії за січень–серпень 2024 року, які фіксують зміну тактики противника та результативність українських ударів по тилових об'єктах противника [3-6];

дані про характеристики західних та вітчизняних БпЛА (“Лелека”, “Shark”, та інші), засобів РЕБ та ракетного озброєння [3-6].

У роботі зроблено припущення, що противник зберігатиме кількісну перевагу в засобах повітряного нападу та продовжуватиме адаптацію тактики ракетно-дронових ударів (модернізація різних БпЛА, використання нових маршрутів) [3-6]. Основним обмеженням дослідження є закритий характер частини даних щодо роботи систем бойового управління та точних параметрів протидії засобам РЕБ противника, що компенсувалося використанням відкритих аналітичних джерел та методів екстраполяції [7, 19].

Поєднання аналізу західних теоретичних моделей MDO з жорстким емпіричним аналізом реалій війни в Україні дозволило сформувати концепцію, яка не лише відповідає стандартам НАТО, але й пропонує перевірені практикою рішення для досягнення асиметричної переваги над технологічно розвиненим противником.

### Результати

Проведений аналіз бойових дій за період січень–серпень 2024 року дозволив виявити стійку тенденцію до зміщення центру ваги збройної боротьби у площину дистанційного протиборства. Встановлено, що традиційна парадигма завоювання переваги в повітрі у класичному розумінні НАТО (AJR-3.3) стає практично недосяжною в умовах насиченої ешелюваної системи ППО противника без застосування мультидомених підходів [15].

Статистичний аналіз застосування засобів повітряного нападу противником демонструє перехід до тактики масованого використання дешевих рішень для виснаження ППО з подальшим нанесенням ударів високоточними засобами. Зокрема, лише у лютому 2024 року противник застосував понад 1500 керованих авіаційних бомб (різних калібрів КАБ з УМПК), встановивши абсолютний рекорд на той час [4]. Водночас, Сили оборони України продемонстрували ефективність асиметричної стратегії, завдаючи ударів по стратегічній глибині противника (аеродроми

“Олень”, “Енгельс”, нафтопереробна інфраструктура) з використанням БпЛА дальнього радіусу дії, що підтверджує тезу про стирання меж між тактичним та стратегічним рівнями у мультидоменній операції [6].

На основі емпіричних даних виявлено закономірність – успішність ударної місії прямо узгоджується не з кількістю залучених авіаційних платформ, а зі швидкістю циклу обробки інформації та ступенем синхронізації ефектів у кібернетичному, електромагнітному та фізичному просторах. Це підтверджує припущення, що широке застосування безпілотних систем створює нову інтегровану цифрову інфраструктуру поля бою, в якій засоби виявлення та ураження діють децентралізовано, а не зосереджені в межах однієї платформи [2].

На основі критичного переосмислення західних концепцій MDO та багатодоменна інтеграція (MDI) [16, 22], пропонується визначення мультидоменної ударної операції для Повітряних Сил Збройних Сил України. Це не просто координація видів (joint operations), а синхронізація спроможностей, де дії в одному домені (наприклад, кібератака на систему зв'язку ППО або удар БпЛА по РЛС) створюють “вікна можливостей” для нанесення вирішального удару авіацією в іншому [16, 22].

Обґрунтовність запропонованого підходу підтверджується найновішою доктриною НАТО AJP-3 [8]. У цьому документі Альянс офіційно відійшов від старої термінології, визначивши MDO саме як “синхронізацію військової діяльності у всіх операційних доменах і середовищах з невійськовою діяльністю, для створення конвергентних ефектів”. Це доводить, що виділені принципи конвергенції та синхронізації невійськових ефектів (кібер-, інформаційних) є не просто теоретичною моделлю, а новим імперативом для сумісності з силами партнерів. Пропонується модель змішаної розвідувально-ударної групи (ЗмРУГ), яка практично імплементує закладені в AJP-3 принципи “єдності, взаємозв'язку та спритності” в умовах реальних бойових дій.

Розроблена концептуальна модель базується на трьох принципах:

конвергенція ефектів, замість фізичного зосередження сил, пропонується фокусування різномірних впливів (кінетичних, РЕБ, інформаційних) на критичних вразливостях противника у визначений час;

модульність сил, відмова від жорстких організаційних структур на користь змішаних ударних груп, які формуються під конкретне завдання;

локальна операційна автономність, надання командирам тактичної ланки та безпілотним системам права на прийняття рішень в умовах втрати зв'язку, що є критичним в умовах протидії засобів РЕБ противника [18].

3. Обґрунтування модульної архітектури ударних спроможностей. Запропонована структура ЗмРУГ включає (рис. 1):



Рисунок 1. Архітектура змішаної розвідувально-ударної групи.

сенсорний модуль – сукупність даних супутникової розвідки, засобів радіотехнічної розвідки та мережі розвідувальних БпЛА (типу Shark, PD-2), інтегрованих через систему ситуаційної обізнаності (наприклад, ІС “Delta”) (Рис. 2) [3-6];



Рисунок 2. Структура сенсорного модуля. (Варіант).

модуль демонстраційних дій та придушення – використання БпЛА-приманок та засобів РЕБ для викриття та подальшого придушення засобів радіолокації противника, що створює умови для дій авіації (рис. 3);



Рисунок 3. Структура модуля демонстраційних дій та придушення. (Варіант)

ударний модуль – пілотовані платформи (Су-24М, Су-27, МіГ-29, F-16, Mirage, Grippen та Rafale) що можуть бути носіями далекобійного озброєння (Storm Shadow/SCALP, JDAM-ER, AASM), що діють із зон поза досяжністю засобів ППО противника, а також ударні безпілотні літальні апарати (рис. 3) [3-6].



Рисунок 3. Структура ударного модуля.  
(Варіант).

Ця архітектура дозволяє реалізувати принцип “комплексного вогневого ураження”, де БпЛА виступають першим ешеленом, виснажуючи ППО, а пілотована авіація завдає точкових ударів по ключових вузлах [2].

При цьому критичним засобом забезпечення точності функціонування ЗМРУГ виступає космічний домен. Аналіз показує, що космічні послуги позиціонування, навігація, таймінг (PNT) є фундаментом для високоточного ураження, дозволяючи боєприпасам типу JDAM-ER та ракетам GMLRS уражати цілі за координатами з точністю до метрів незалежно від погодних умов [22]. Крім того, космічний сегмент забезпечує глобальну розвідку (ISR) для виявлення цілей у глибокому тилу противника, недосяжному для тактичних дронів, а також підтримує загоризонтний зв’язок для управління безпілотними системами в реальному часі [23, 24]. Саме інтеграція космічних даних перетворює розрізнені удари на скоординовану високоточну операцію [20].

Оновлена доктринальна база НАТО (AJP-3.3) офіційно закріплює космічну координацію (SDC) та обізнаність у космічному просторі (SDA) як нероздільні складові повітряної операції, оскільки без цих сервісів сучасні високоточні засоби та безпілотні літальні апарати стають вкрай вразливими в умовах радіоелектронної протидії [9].

3. Модульна архітектура сил ЗМРУГ не є жорсткою штатною одиницею, а формується під завдання. Синхронізація забезпечується тим, що керівник місії (який може перебувати на борту літака типу AWACS або на землі) бачить цілісну картину поля бою, яку формують десятки дронів, та здійснює управління пілотованою авіацією для точкових ударів. Це дозволяє реалізувати обрану концепцію концепцію [2], де втрата одного дрона не руйнує управління, а пілотований літак максимально захищений віддаленістю від цілі.

Синхронізація в ЗМРУГ – це перехід від послідовних дій (дрон полетів, побачив, повернувся, доповів – літак полетів) до паралельних та автоматизованих процесів в єдиному цифровому просторі, що дозволяє нівелювати кількісну перевагу противника.

4. Система управління (MDC2). Моделювання показало, що ефективність запропонованої

концепції критично залежить від впровадження системи MDC2 [25]. На відміну від ієрархічних систем, MDC2 має забезпечувати горизонтальні зв’язки між сенсорами та ефекторами (“sensor-to-shooter”) у реальному часі [12]. Впровадження автоматизованих систем управління (типу “Дзвін АС”, “Ореанда ПС”) дозволяє скоротити час циклу прийняття рішень з годин до хвилин [7]. Однак, з огляду на описані раніше ризики надмірної опори на цифрову прозорість поля бою [14], автори пропонують гібридну модель управління: централізоване планування (синхронізація) та децентралізоване виконання (автономність) у разі порушення комунікацій.

Крім того, спираючись на оновлений понятійний апарат AJP-3 [8], пропонується в архітектурі системи управління перейти від традиційного “управління бойовим простором” до концепції “організації простору бойового застосування”. Це критично важливо для ефективності запропонованої мультидоменної групи, оскільки “простір бойового застосування” тепер офіційно включає не лише фізичні зони (повітря, земля), а й віртуальний та когнітивний виміри. Тобто, система управління ЗМРУГ має технічно забезпечувати координацію не лише ракетних ударів, а й дій у електромагнітному спектрі та кіберпросторі як єдиного цілого, що раніше розглядалося відокремлено.

Більше того, згідно з оновленою доктриною НАТО AJP-3.3 [9], повітряні операції офіційно визнаються НАТО однією із найсильніших руйнівних сил інтеграції мультидоменних операцій. Оскільки проведення повітряних місій вимагає залучення елементів з усіх інших доменів (навігація з космосу, кіберзахист мереж, наземне прикриття), система управління повітряним компонентом має потенціал стати базовою платформою для MDC2.

5. Перевірка результатів та практичне значення. Аналіз успішних операцій Сил оборони України у 2024 році, зокрема знищення літаків А-50 та ураження об’єктів Чорноморського флоту, підтверджує достовірність запропонованої концепції [4, 5]. Ці операції були реалізовані саме завдяки мультидоменній інтеграції поєднанню дій Повітряних Сил ЗС України, розвідувальних органів та безпілотних систем. Виявлено, що інтеграція західних зразків озброєння (крилатих ракет Storm Shadow, протирадіолокаційних ракет AGM-88 HARM, бомб JDAM-ER та ін.) з радянськими авіаційними платформами є лише перехідним етапом. Повноцінна реалізація концепції MDO можлива при переході на платформи, що від початку спроектовані як елементи мережецентричної війни (наприклад, американські F-35 або модернізовані F-16 block 70, шведські JAS-39 Grippen і французькі Rafale, які виступають як “повітряні сенсори” та координатори) [26].

Результати застосувань свідчать про те, що перехід до мультидоменної концепції ударних дій є безальтернативним шляхом розвитку повітряних сил. Запропонована модульна архітектура та

принципи MDC2 дозволяють нівелювати кількісну перевагу противника за рахунок інформаційної та управлінської переваги, перетворюючи авіацію з ізольованого інструменту на ключовий елемент інтегрованої системи ураження.

### **Обговорення**

Результати, що були отримані під час застосування засобі свідчать про те, що концепція MDO в умовах російсько-української війни трансформувалася з теоретичної моделі НАТО в імператив виживання та досягнення успіху. Аналіз емпіричних даних за 2024 рік підтверджує гіпотезу, що традиційна модель “завоювання переваги в повітрі” через фізичне знищення ППО противника є недосяжною в умовах паритету технологій та насиченості поля бою засобами ППО. Натомість, успіх досягається через створення тимчасових “вікон можливостей” шляхом конвергенції ефектів у кібернетичному, електромагнітному та фізичному просторах [7, 13].

Запропонована концепція ЗмРУГ дозволяє реалізувати принцип “комплексного вогневого ураження”, описаний В. Турретом [2]. Це підтверджується успішними кейсами ураження стратегічних об’єктів (аеродроми “Морозовськ”, “Енгельс”) комбінованими засобами: БПЛА дальнього радіусу дії виснажують ППО, а високоточні ракети (Storm Shadow/SCALP) або БПЛА великої дальності дії завдають фінального удару [5, 6].

Водночас, запропонований підхід цілком узгоджується з позицією експертів JAPCC щодо необхідності переходу від простої координації до “синхронізації” дій, де космічні та кібернетичні спроможності інтегруються на тактичному рівні [12, 18]. Однак, на відміну від західних моделей, що спираються на дорогі платформи 5-го покоління (наприклад F-35) як сенсори [26], розроблена модель адаптує цей підхід під використання відносно дешевих БПЛА та модернізованих радянських платформ, що є унікальним внеском у теорію асиметричної війни.

Окремої уваги в контексті дискусії заслуговує питання стійкості космічної архітектури, яка є фундаментом для навігації та зв’язку в MDO. Спираючись на дослідження Р. Гібсона (JAPCC), варто наголосити, що сучасна концепція мультидоменних операцій не повинна обмежуватися лише використанням космічних спроможностей, а має враховувати активну протидію противника у цьому домені [27]. В рф розглядають залежність високотехнологічних армій від супутникових сервісів (PNT) як критичну вразливість і реалізують стратегію “постановки завдань та придушення”. Емпіричний досвід війни в Україні, де фіксується масоване застосування засобів РЕБ для придушення сигналів GPS та супутникового зв’язку, підтверджує тезу Гібсона про необхідність готовності військ до дій в умовах “деградованого космічного середовища” (Design, Defense, Distance, Space, Operations, Spectrum (EMS) – D3SOE) [27]. Отже, запропонована архітектура ЗмРУГ передбачає високий рівень

автономності не лише як тактичну перевагу, а як вимушену необхідність для збереження боєздатності при втраті доступу до глобальних навігаційних та комунікаційних систем. Це вимагає від штабів планувати операції з урахуванням сценаріїв повної ізоляції передових підрозділів, що відповідає висновкам про необхідність резервних систем навігації та децентралізації управління.

Валідність отриманих результатів базується на аналізі унікального масиву даних бойових дій високої інтенсивності, якого не мають західні партнери. Однією з ключових переваг роботи є підтвердження дієвості комплексної інтеграції західного озброєння (JDAM-ER, AASM-250 Hammer) [4] з вітчизняною системою ситуаційної обізнаності (Delta) [2, 7]. Зазначене дало змогу відійти від суто теоретичних припущень та запропонувати перевірену модель скорочення циклу прийняття рішень (OODA-loop), що нівелює кількісну перевагу противника.

Водночас варто відзначити певні обмеження проведеного дослідження. По-перше, запропонована концепція значною мірою залежить від стійкості каналів передачі даних. Як зазначають Д. Еллісон та Т. Свейс, ризик переривання комунікацій залишається “сліпою зоною” багатьох концепцій MDO [14]. Хоча як базовий контрзахід у роботі пропонується високий рівень автономності, технічна реалізація надійного “бойового інтернету” в умовах РЕБ потребує додаткового технічного опрацювання. По-друге, дослідження не повною мірою враховує фактор когнітивного перевантаження командирів, який виникає при спробі керувати сотнями дронів та пілотованих літаків одночасно [18]. Необхідно додатково дослідити організаційні аспекти управління, аби уникнути надмірного контролю з боку штабів, який здатний негативно впливати на темпи виконання завдань.

Теоретичним значенням роботи стане розширення категоріального апарату воєнної науки, уточнюючи поняття “синхронізація” та “дронізація” в контексті операцій Повітряних Сил ЗС України. Запропоновано перехід від лінійного планування повітряних операцій до мультидоменної концепції дій.

Практичні значення можуть бути використані Генеральним штабом ЗС України для оптимізації організаційно-штатної структури авіаційних бригад (введення штабних елементів MDO), а також для формування вимог до перспективних АСУ та безпілотних авіаційних комплексів. Рекомендації щодо інтеграції FPV-дронів у контур ППО та ударних дій [21] мають пряме прикладне значення для підвищення ефективності бойових дій вже сьогодні.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що імплементація принципів MDO стає критичною умовою збереження боєздатності та подальшої еволюції авіаційної компоненти ЗС України. Однак, її реалізація вимагає не лише технологічного переозброєння, а й ментальної зміни культури штабів. Подальші дослідження

доцільно зосередити на двох напрямках:

1. Розробка алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого розподілу цілей у системі MDC2, щоб зняти навантаження з операторів [2, 12].

2. Дослідження логістичних обмежень мультидоменних операцій, оскільки, як показав аналіз, інтенсивність використання високоточних засобів створює безпрецедентне навантаження на систему забезпечення.

### Висновки

У дослідженні теоретично обґрунтовано зміну парадигми застосування повітряної компоненти у сучасній війні високої інтенсивності. Доведено, що класична концепція “завоювання переваги в повітрі”, притаманна доктрина НАТО, в умовах насиченої ешелонованої ППО трансформується у концепцію створення тимчасових “вікон можливостей” через конвергенцію ефектів у кібернетичному, електромагнітному та фізичному доменах. У дослідженні вперше формалізовано поняття “змішаної розвідувально-ударної групи” як базової організаційної одиниці для ведення мультидоменних операцій в умовах обмежених ресурсів. Встановлено, що “дронізація” бойових дій виступає не просто тактичним покращенням, а каталізатором переходу до мережецентричної війни, де безпілотні авіаційні системи формують нову архітектуру розвідки та ураження, компенсуючи дефіцит традиційної пілотованої авіації.

Запропонована мультидоменна концепція має прикладне значення для планування операцій та розвитку Повітряних Сил ЗС України:

1. Рекомендовано перехід від жорсткої ієрархічної структури до модульного принципу формування ударних груп, що дозволяє інтегрувати різномірні засоби (пілотовані літаки, БпЛА, наземні засоби РЕБ) під єдиним ситуаційним управлінням.

2. Обґрунтовано концепцію ударних дій шляхом “синхронізації”, використовуючи дешеві БпЛА-приманки та засоби РЕБ для розкриття та виснаження системи ППО з подальшим нанесенням ударів високоточною зброєю (типу JDAM-ER, AASM) з носіїв пілотованої авіації.

3. Доведено необхідність впровадження автоматизованих систем управління (на кшталт “Дзвін АС”, “Ореанда ПС” та Delta) для скорочення циклу прийняття рішень та забезпечення горизонтальних зв’язків “сенсор–стрілець”.

Для подальших досліджень фахівцям рекомендується зосередити подальшу увагу на:

дослідженні проблем стійкості каналів передачі даних в умовах активної роботи перспективних засобів РЕБ противника та розробці алгоритмів автономної роботи ударних груп при втраті зв’язку.

аналізі ризиків когнітивного перевантаження командирів в умовах мультидоменного управління та розробці інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для автоматизації розподілу цілей.

вивченні логістичних аспектів забезпечення мультидоменних операцій, оскільки розосередження сил та інтенсивність бойових дій

вимагають нових підходів до матеріально-технічного забезпечення.

У процесі підготовки цієї статті авторами було використано Gemini AI з метою покращення лінгвістичної якості тексту (граматика, стилістика), технічному створенні достовірних зображень. Автори підтверджують, що використання вказаних інструментів не вплинуло на наукову новизну, достовірність та цілісність результатів дослідження, а вся відповідальність за кінцевий зміст покладається на авторів.

### Список використаних джерел

- [1.] S. Cannon, “The Alliance’s Transition to Multi-Domain Operations: An AIRCOM Perspective,” JAPCC Journal, no. 37, May 2024. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/articles/the-alliances-transition-to-multi-domain-operations/>.
- [2.] Vincent Tourret, “Design, Destroy, Dominate: The Mass Drone Warfare as a Potential Military Revolution”, Ifri Papers, Ifri, June 2025. [Online]. Available: <https://www.ifri.org/en/papers/design-destroy-dominate-mass-drone-warfare-potential-military-revolution>.
- [3.] Колект. авт., *Воєнно-історичний опис російсько-української війни: Вип. 23: січень 2024 року*. Київ, 2024.
- [4.] Колект. авт., *Воєнно-історичний опис російсько-української війни: Вип. 24: лютий 2024 року*. Київ, 2024.
- [5.] Колект. авт., *Воєнно-історичний опис російсько-української війни (березень-травень 2024 року)*. Київ: НУОУ, 2025.
- [6.] Колект. авт., *Воєнно-історичний опис російсько-української війни (червень-серпень 2024 року)*. Київ: НУОУ, 2025.
- [7.] В. В. Злакоман, В. В. Гордійчук Концепція мультидоменних операцій для оборони України: технологічний аспект. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. № 3(45)/2022. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-45-3-37-44>.
- [8.] Allied Joint Doctrine for the Conduct of Operations, Allied Joint Publication 3, Edition D, Version 1, NATO Standardization Office, Brussels, Belgium, Aug. 2025.
- [9.] Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations, Allied Joint Publication 3.3, Edition C, Version 1, NATO Standardization Office, Brussels, Belgium, Feb. 2026.
- [10.] Air-Maritime Coordination, Allied Joint Publication 3.3.3, Edition A, Version 1, NATO Standardization Office, Brussels, Belgium, Dec. 2014.
- [11.] Allied Joint Doctrine for Close Air Support and Air Interdiction, Allied Joint Publication 3.3.2(A), NATO Standardization Agency, Brussels, Belgium, Sep. 2009.
- [12.] J. Cánovas, “Multi-Domain Operations and Challenges to Air Power,” in Joint Air & Space Power Conference 2019 Read Ahead, Kalkar, Germany: JAPCC, 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations-and-challenges-to-air-power/>.
- [13.] S. Cannon, “The Alliance’s Transition to Multi-Domain Operations”, Joint Air & Space Power Conf. 2019 Read Ahead. 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations-and-challenges-to-air-power/>.
- [14.] D. Ellison, T. Sweijts. Empty Promises? A Year Inside the World of Multi-Domain Operations. *War On The Rocks*. 2024. [Online]. Available: <https://warontherocks.com/2024/01/empty-promises-a-year-inside-the-world-of-multi-domain-operations/>.
- [15.] С. Дроздов, В. Тюрін, О. Коршець та В. Горбенко, “Аналіз операційного середовища та ймовірні сценарії застосування Повітряних Сил Збройних Сил

- України”, Наука і оборона, № 3, с. 25–30, 2019. <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2019-8-3-25-30>.
- [16.] Multi-Domain Integration, Joint Concept Note 1/20, Ministry of Defence, London, UK, Nov. 2020.
- [17.] Field Manual 3-0: Operations. Washington, DC: Headquarters, Dept. of the Army, 2025, p. 378.
- [18.] T. Sweijts et al., *Breaking Patterns: Multi-Domain Operations and Contemporary Warfare*, The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS), The Hague, Netherlands, Sep. 2023.
- [19.] S. M. Zeigler, S. Harting, S. J. Bae, J. Brackup, and A. J. Vick, *Aligning Roles and Missions for Future Multidomain Warfare*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2021.
- [20.] J. Black et al., *Multi-Domain Integration in Defence: Conceptual Approaches and Lessons from Russia, China, Iran and North Korea*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2022.
- [21.] “Мультидоменні операції: НПК й FPV формують нову логіку бою,” DOU.ua, 19 листоп. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://dou.ua/forums/topic/56618/>.
- [22.] Jeffrey M. Reilly, “Multi-Domain Operations”, Joint Air & Space Power Conf. 2019 Read Ahead. 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations/>.
- [23.] S. Townsend, “Accelerating Multi-Domain Operations: Evolution of an Idea”, Joint Air & Space Power Conf. 2019 Read Ahead. 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/accelerating-multi-domain-operations-evolution-of-an-idea/>.
- [24.] J. Engstrom, “Systems Confrontation and System Destruction Warfare: How the Chinese People’s Liberation Army Seeks to Wage Modern Warfare”, Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2018.
- [25.] “Doolittle Series 18: Multi-Domain Operations,” LeMay Center for Doctrine Development and Education, Maxwell AFB, AL, USA, LeMay Paper 3, Feb. 2019.
- [26.] А. Шинко, “Армія та ВПС США задіяли F-35 у багатомірних операціях”, Ukrainian Military Pages, 2020. [Онлайн]. Доступно: <https://www.ukrmilitary.com/2020/01/multi-domain-operations.html>.
- [27.] R. W. Gibson, “Multi-Domain Operations and Counter-Space,” in Joint Air & Space Power Conference 2019 Read Ahead, Kalkar, Germany: JAPCC, 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations-and-counter-space/>.

<sup>1</sup>Oleksandr Blyskun (PhD)

<https://orcid.org/0009-0009-7751-8313>

<sup>2</sup>Oleksandr Avramenko (doctor of technical sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0003-1358-1185>

<sup>3</sup>Antonina Yaroshenko

<https://orcid.org/0009-0004-4987-8620>

<sup>2</sup>Oleksii Martyniuk (candidate of technical sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2578-0018>

<sup>1</sup>Main Directorate of Aviation Capability Development, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>The National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine

## MULTI-DOMAIN STRIKE CONCEPT FOR THE AIR COMPONENT

*The rapid transformation of the battlefield and the large-scale employment of unmanned aerial systems necessitate the conceptual adaptation of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine to multi-domain operations. Based on an analysis of NATO doctrinal frameworks and the experience of the Russo-Ukrainian War, this paper formulates a concept for air component strike operations within a multidimensional environment. The study develops an architecture for a modular reconnaissance-strike group designed to execute integrated fire engagement. It is demonstrated that system autonomy under hostile electronic countermeasures is a critical prerequisite for operational effectiveness. The findings provide military experts with a foundation for planning the future development of the Air Force and advanced multi-domain command and control systems.*

**Keywords:** multi-domain operations; strike operations; air defense; unmanned systems; unmanned aerial systems; unmanned aerial vehicle; planning; multi-fire combat; efficiency; system autonomy.

### References

- [1.] S. Cannon, “The Alliance’s Transition to Multi-Domain Operations: An AIRCOM Perspective,” JAPCC Journal, no. 37, May 2024. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/articles/the-alliances-transition-to-multi-domain-operations/>.
- [2.] Vincent Tourret, “Design, Destroy, Dominate: The Mass Drone Warfare as a Potential Military Revolution”, Ifri Papers, Ifri, June 2025. [Online]. Available: <https://www.ifri.org/en/papers/design-destroy-dominate-mass-drone-warfare-potential-military-revolution>.
- [3.] Collective Authors. Military-Historical Description of the russian-ukrainian War: Issue 23: January 2024. Kyiv, 2024.
- [4.] Collective Authors. Military-Historical Description of the russian-ukrainian War: Issue 24: February 2024. Kyiv, 2024.
- [5.] Collective Authors. Military-Historical Description of the russian-ukrainian War (March–May 2024). Kyiv: National University of Defense of Ukraine (NUOU), 2025.
- [6.] Collective Authors. Military-Historical Description of the russian-ukrainian War (June–August 2024). Kyiv: National University of Defense of Ukraine (NUOU), 2025.
- [7.] Zlakoman, V. V., & Hordiichuk, V. V. “The Concept of Multi-Domain Operations for the Defense of Ukraine: Technological Aspect.” Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence. No. 3(45)/2022. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-45-3-37-44>.

- [8.] Allied Joint Doctrine for the Conduct of Operations, Allied Joint Publication 3, Edition D, Version 1, NATO Standardization Office, Brussels, Belgium, Aug. 2025.
- [9.] Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations, Allied Joint Publication 3.3, Edition C, Version 1, NATO Standardization Office, Brussels, Belgium, Feb. 2026.
- [10.] Air-Maritime Coordination, Allied Joint Publication 3.3.3, Edition A, Version 1, NATO Standardization Office, Brussels, Belgium, Dec. 2014.
- [11.] Allied Joint Doctrine for Close Air Support and Air Interdiction, Allied Joint Publication 3.3.2(A), NATO Standardization Agency, Brussels, Belgium, Sep. 2009.
- [12.] J. Cánovas, "Multi-Domain Operations and Challenges to Air Power," in Joint Air & Space Power Conference 2019 Read Ahead, Kalkar, Germany: JAPCC, 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations-and-challenges-to-air-power/>.
- [13.] S. Cannon, "The Alliance's Transition to Multi-Domain Operations", Joint Air & Space Power Conf. 2019 Read Ahead. 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations-and-challenges-to-air-power/>.
- [14.] D. Ellison, T. Sweijts, Empty Promises? A Year Inside the World of Multi-Domain Operations. War On The Rocks. 2024. [Online]. Available: <https://warontherocks.com/2024/01/empty-promises-a-year-inside-the-world-of-multi-domain-operations/>.
- [15.] Drozdov, S., Tyurin, V., Korshets, O., & Horbenko, V. "Analysis of the Operational Environment and Probable Scenarios for the Employment of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine." Science and Defense, no. 3, pp. 25–30, 2019. <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2019-8-3-25-30>
- [16.] Multi-Domain Integration, Joint Concept Note 1/20, Ministry of Defence, London, UK, Nov. 2020.
- [17.] Field Manual 3-0: Operations. Washington, DC: Headquarters, Dept. of the Army, 2025, p. 378.
- [18.] T. Sweijts et al., Breaking Patterns: Multi-Domain Operations and Contemporary Warfare, The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS), The Hague, Netherlands, Sep. 2023.
- [19.] S. M. Zeigler, S. Harting, S. J. Bae, J. Brackup, and A. J. Vick, Aligning Roles and Missions for Future Multidomain Warfare. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2021.
- [20.] J. Black et al., Multi-Domain Integration in Defence: Conceptual Approaches and Lessons from Russia, China, Iran and North Korea. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2022.
- [21.] "Multi-Domain Operations: UGV and FPV Drones Shape a New Logic of Combat," DOU.ua, Nov. 19, 2025. [Online]. Available: <https://dou.ua/forums/topic/56618/>.
- [22.] Jeffrey M. Reilly, "Multi-Domain Operations", Joint Air & Space Power Conf. 2019 Read Ahead. 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations/>.
- [23.] S. Townsend, "Accelerating Multi-Domain Operations: Evolution of an Idea", Joint Air & Space Power Conf. 2019 Read Ahead. 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/accelerating-multi-domain-operations-evolution-of-an-idea/>.
- [24.] J. Engstrom, "Systems Confrontation and System Destruction Warfare: How the Chinese People's Liberation Army Seeks to Wage Modern Warfare", Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2018.
- [25.] "Doolittle Series 18: Multi-Domain Operations," LeMay Center for Doctrine Development and Education, Maxwell AFB, AL, USA, LeMay Paper 3, Feb. 2019.
- [26.] Shynko, A. "U.S. Army and Air Force Deploy F-35s in Multi-Domain Operations," Ukrainian Military Pages, 2020. [Online]. Available: <https://www.ukrmilitary.com/2020/01/multi-domain-operations.html>.
- [27.] R. W. Gibson, "Multi-Domain Operations and Counter-Space," in Joint Air & Space Power Conference 2019 Read Ahead, Kalkar, Germany: JAPCC, 2019. [Online]. Available: <https://www.japcc.org/essays/multi-domain-operations-and-counter-space/>

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-28-34

УДК 355.351/354

Веровок Микола Вікторович

<https://orcid.org/0009-0001-9932-3074>

Поліщук Сергій Васильович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-9050-6918>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 23.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 01.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗВІДКИ ПОВІТРЯНОГО ПРОТИВНИКА В НАСТУПАЛЬНІЙ ОПЕРАЦІЇ

Одним з основних заходів, що проводиться під час підготовки до проведення наступальної операції є планування бойового застосування, результатом якого є вибір варіанту функціонування системи розвідки повітряного противника. Варіант функціонування системи розвідки повітряного противника визначається за результатами моделювання декількох варіантів та їх оцінки.

У статті представлено удосконалену методику оцінювання ефективності функціонування системи розвідки повітряного противника в наступальній операції яка, на відміну від існуючих, дозволяє визначити варіант способу застосування сил і засобів системи розвідки повітряного противника в умовах невизначеності вимог споживачів інформації про повітряного противника. Методика дозволяє провести оцінювання ефективності функціонування системи розвідки повітряного противника з урахуванням факторів притаманним наступальним операціям, а саме: необхідності проведення інженерної розвідки та розмінювання шляхів висунування та позицій підрозділів системи розвідки повітряного противника.

Застосування методики забезпечує обґрунтоване прийняття управлінських рішень під час планування бойового застосування в ході наступальної операції.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в роботу органів військового управління для фахівців оперативної і тактичної ланки управління, які здійснюють планування застосування сил і засобів розвідки повітряного противника в операціях.

**Ключові слова:** модель функціонування; ефективність; система розвідки повітряного противника; оцінювання ефективності; функціонування системи, показник ефективності.

### Вступ

Під час проведення наступальної операції одним із основних завдань є завоювання переваги у повітрі. Виконання цього завдання забезпечує захист наземних угруповань від ударів противника з повітря та створення умов для виконання ними завдань наступальної операції. Досвід воєнних конфліктів сучасності свідчить, що успіх будь-якої операції залежить від ефективності протиповітряної оборони (ППО) військ і об'єктів [1,2], для чого створюється угруповання сил і засобів ППО.

Інформаційною складовою системи ППО є підсистема розвідки повітряного противника. Відповідно, ефективне функціонування системи розвідки повітряного противника (СРПП) в наступальній операції є необхідною умовою.

Проте, аналіз досвіду проведення наступальних операцій Силами Оборони України під час російсько-української війни [3], дозволяє зробити висновок про недостатню ефективність функціонування СРПП для забезпечення умов успішного виконання завдання завоювання переваги в повітрі. Однією із причин недостатньої ефективності є неврахування під час планування особливостей функціонування СРПП в сучасній наступальній операції оперативного угруповання

військ (сил).

Сучасним наступальним операціям притаманний високий рівень невизначеності обстановки. Це, в свою чергу, визначає складність обґрунтування прийнятих рішень на ефективне застосування військ, в тому числі і системи розвідки повітряного противника. Це є одним з ключових проблемних питань забезпечення ефективного використання сил та засобів СРПП для досягнення завдань наступальної операції.

Отже, питання щодо забезпечення ефективного функціонування СРПП на сьогоднішній день залишається актуальним і потребує подальшого дослідження.

### Матеріали та методи

Для оцінювання ефективності функціонування СРПП, необхідно мати відповідний науково-методичний апарат.

В сучасній науці існує ряд робіт, присвячених цьому питанню.

В роботах [4, 5] оцінювання ефективності функціонування СРПП проводиться за показником математичного сподівання кількості виявлених цілей, з урахуванням просторових параметрів радіолокаційного поля, що створюється підрозділами розвідки повітряного противника відповідно до визначених вимог споживачів.

В роботі [6] використовується імітаційно-детермінований метод моделювання процесу на основі реалізації послідовного моделювання процесів, що протікають. При цьому ефективність функціонування СРПП оцінюється ефективністю виконання часткових завдань кожною підсистемою СРПП у відповідності до сформованих вимог споживачів.

В роботі [7] використовується метод імітаційного моделювання процесу радіолокаційного забезпечення бойових дій сил і засобів ППО із визначенням варіанта бойового застосування системи розвідки повітряного противника через визначення тактичних ситуацій бойового застосування системи розвідки повітряного противника та відповідних їм бойових порядків. При цьому в роботах [4-7] не враховується здійснення маневру підрозділами розвідки повітряного противника для нарощування поля розвідки повітряного противника.

В роботі [8] автори при оцінюванні ефективності функціонування СРПП використовують аналітико-стохастичну модель радіолокаційного забезпечення сил і засобів угруповання ППО. Проте в роботі не враховується імовірнісний характер формування вимог споживачів інформації про повітряного противника.

В роботі [9] враховано перерозподіл ресурсів під час функціонування СРПП в умовах ресурсних обмежень. Проте в методиці не враховано маневр підрозділів.

В роботі [10] використовується методика оцінювання ефективності функціонування СРПП, яка базується на забезпеченні інформацією про повітряного противника відповідних споживачів. При чому потреби споживачів приймаються постійними в просторі та часі, тобто не враховуються вимоги споживачів до інформації про повітряного противника в часі відповідно до обраного варіанту застосування.

Аналіз існуючого науково-методичного апарату дозволяє стверджувати, що на даний час створена досить розвинута теорія оцінювання ефективності функціонування СРПП. Проте в існуючих методиках не враховуються особливості функціонування СРПП в наступальній операції: необхідність проведення інженерної розвідки та розмінування шляхів висування до визначених позицій підрозділів розвідки повітряного противника, а також імовірнісний характер формування вимог споживачів інформації про повітряного противника, що залежить від умов проведення наступальної операції.

Таким чином існуючий науково-методичний апарат не дозволяє провести оцінювання ефективності функціонування СРПП з урахуванням особливостей виконання завдань в наступальній операції та потребує удосконалення.

Отже, **метою статті** є викладення основних положень удосконаленої методики оцінювання

ефективності функціонування СРПП в наступальній операції, яка адаптована до умов проведення наступальної операції.

Дослідження проведено з використанням відомих наукових методів, зокрема, аналізу, аналітичного та структурного моделювання, теорії ймовірностей, що дозволяє провести оцінювання функціонування складної системи військового призначення, якою є СРПП, в наступальній операції.

## Результати

Одним з основних заходів, що проводиться під час підготовки до проведення наступальної операції є планування бойового застосування СРПП, результатом якого є вибір варіанту функціонування СРПП. Варіант функціонування СРПП визначається за результатами моделювання декількох варіантів та їх оцінки [11]. У найбільш загальному вигляді він являє собою детально розроблений спосіб вирішення поставлених завдань та визначає оптимальний склад та порядок розподілу підрозділів СРПП. У варіанті визначаються дії кожного пункту управління та підрозділів розвідки повітряного противника, розподіл зусиль між ними. Зміст дій підрозділів розвідки повітряного противника у кожному з варіантів відрізняється об'ємом завдань, які вирішуються підрозділом розвідки в цілому, кількістю та типами задіяних засобів розвідки, засобів зв'язку та комплексних засобів автоматизації, режимами роботи засобів розвідки та секторами ведення розвідки повітряного противника, способами обробки та видачі розвідувальної та бойової інформації, особливостями їх видачі для забезпечення бойових дій вогневих засобів ППО.

У загальному вигляді методика оцінювання ефективності функціонування СРПП в наступальній операції зводиться до наступних етапів:

визначення варіантів проведення наступальної операції;

визначення вимог споживачів до інформації про повітряного противника, відповідно до варіантів проведення наступальної операції;

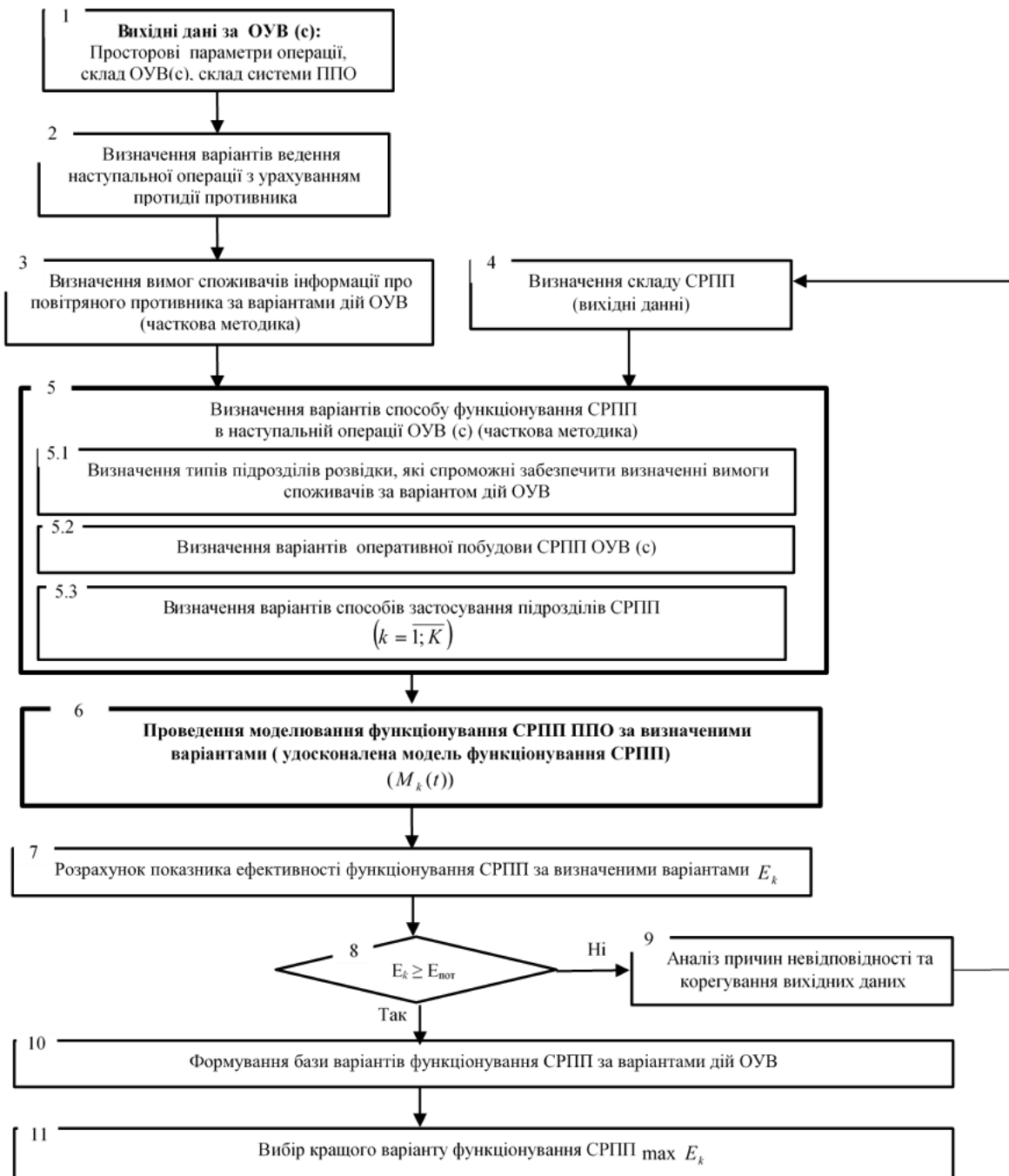
визначення варіантів способу функціонування СРПП в наступальній операції;

проведення моделювання функціонування СРПП за визначеними варіантами ППО;

проведення розрахунку показника оцінювання ефективності функціонування СРПП.

Структурна схема удосконаленої методики оцінювання ефективності функціонування системи розвідки повітряного противника в наступальній операції наведена на рис 1.

В блоці 1 визначаються вихідні данні за ОУВ: склад військ, які входять до складу ОУВ (с); просторові розміри проведення наступальної операції; географічні умови проведення операції, а також склад системи ППО.



**Рисунок 1** – Структурна схема удосконаленої методики оцінювання ефективності функціонування системи розвідки повітряного противника в наступальній операції

В блоці 2 визначаються варіанти ведення наступальної операції: порядок і послідовність дій військових частин і підрозділів, які приймають участь в наступальній операції, вогневого ураження засобів повітряного нападу противника вогневыми засобами, що входять до системи ППО та подальшого їх переміщення, вслід за військами, що наступають.

В блоці 3 на основі варіантів ведення наступальної операції (блок 2) формується перелік вимог споживачів до інформації про повітряного противника, які змінюються у часі.

Непостійність вимог споживачів до інформації про повітряного противника у часі дозволяє зробити висновок, що процес функціонування

СРПП в наступальній операції доцільно розглядати як послідовну сукупність визначених завдань СРПП, які обумовлені потоком вимог споживачів до інформації про повітряного противника в процесі виконання ними своїх завдань що змінюються у часі.

Під завданнями функціонування СРПП в методиці розуміється сполучення варіанту вимог споживачів інформації про повітряного противника в часі та відповідного йому варіанту способу функціонування СРПП.

Для визначення всіх можливих завдань в ході функціонування СРПП в наступальній операції під час забезпечення споживачів інформацією про повітряного противника відповідно до варіанту

ведення наступальної операції, треба описати всі вимоги, які можуть бути пред'явлені споживачами інформації.

Кожен зі споживачів інформації про повітряного противника виконує свої специфічні завдання на визначеній території у визначеному бойовому порядку та висуває свої конкретні вимоги до неї. Дані вимоги пред'являються до рубежів виявлення для видачі інформації  $B_D$ , до точності інформації  $B_\sigma$ , до верхньої межі поля розвідки повітряного противника  $B_{VM}$ , до нижньої межі поля розвідки повітряного противника  $B_{NM}$ , по кількості цілей, які необхідно видати  $B_{вц}$  [11].

Слід зазначити, що вимоги кожного споживача відрізняються в залежності від завдань, що виконуються за даною інформацією (бойове управління частинами (підрозділами), цілевказівка зенітному ракетному комплексу, наведення винишувача, або БпЛА на повітряну ціль, оповіщення військ про дії ЗПН противника). Крім того, вимоги споживачів  $P_i$  є функцією часу, тобто:

$$B_a = \{B_D, B_\sigma, B_{VM}, B_{NM}, B_{вц}\} \quad (1)$$

Таким чином, для СРПП визначається множина споживачів ( $S$ ), яких необхідно забезпечити інформацією про повітряного противника потрібної якості  $S = \{S_a\}$ , де  $a = \overline{1, A}$ ,  $A$  – кількість споживачів.

В блоці 4 визначаються вихідні дані, щодо складу СРПП: пунктів управління; підрозділів радіолокаційної розвідки радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, військ ППО Сухопутних військ, підрозділів радіо- та радіотехнічної розвідки, оптико-електронної та візуальної розвідки всіх видів і родів військ (сил), які входять до складу наступального угруповання; системи зв'язку та автоматизованого управління.

В блоці 5 визначаються варіанти способу функціонування СРПП в наступальній операції за визначеними варіантами ведення наступальної операції ОУВ. Вирішення цього завдання проводиться відповідно до часткової методики визначення варіантів способу функціонування СРПП в наступальній операції ОУВ (с).

Результатом визначення варіанту способу функціонування СРПП в наступальній операції є знаходження такого складу та оперативної побудови СРПП, які дозволять створити поле розвідки повітряного противника з параметрами, що забезпечать реалізацію потрібних вимог споживачів до інформації про повітряного противника за визначеними варіантами ведення наступальної операції ОУВ.

З цією метою в субблоці 5.1 визначаються типи підрозділів розвідки, які спроможні забезпечити визначенні вимоги споживачів за варіантом дій ОУВ. Для цього множину вимог споживачів, що приймають участь у наступальній операції представимо як вектор вимог:  $B = \{B_a\}$ , де  $a = \overline{1, A}$ ,  $A$  – кількість вимог споживачів.

Тоді, вимоги кожного  $j$ -го споживача описуються вектором вимог  $B_a$

$$B_{aj} = \{B_{Dj}, B_{\sigma j}, B_{VMj}, B_{NMj}, B_{вцj}\} \quad (2)$$

Кожний  $i$ -й підрозділ розвідки повітряного противника можна описати вектором його бойових спроможностей підрозділів розвідки ПП.

$$R_i = \{m_{1i}, m_{2i}, \dots, m_{ni}\} \quad (3)$$

Для визначення підрозділів розвідки, які зможуть забезпечити вимоги  $j$ -го споживача, створюється матриця відповідності  $Q$  (табл. 1).

Матриця відповідності  $Q$  має розмірність  $R \times A$  і визначається як:

$$Q = \|C_{ij}\|, i = \overline{1, R}, j = \overline{1, A} \quad (4)$$

де  $R$  – загальна кількість підрозділів розвідки у складі СРПП;

$A$  – загальна кількість споживачів інформації згідно з варіантом дій ОУВ;

$C_{ij}$  – ознака спроможності  $i$ -ого підрозділу розвідки повітряного противника забезпечити вимоги  $j$ -го споживача;

Таблиця 1

**Матриця визначення типів підрозділів розвідки, які можуть забезпечити вимоги визначених споживачів розвідки, які можуть забезпечити вимоги визначених споживачів**

$i \backslash j$	1	2	3	...	$A$
1	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	...	$C_{1A}$
2	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	...	$C_{2A}$
3	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	...	$C_{3A}$
...	...	...	...	...	...
$R$	$C_{R1}$	$C_{R2}$	$C_{R3}$	...	$C_{RA}$

$i$ -й підрозділ розвідки повітряного противника вважається спроможним забезпечити вимоги  $j$ -го споживача, якщо виконується система нерівностей:

$$C_{ij} = \begin{cases} \sigma_i \leq \sigma_j \\ H_{NMi} \leq H_{NMj}^{потр} \\ H_{VMi} \geq H_{VMj}^{потр} \end{cases} \quad (5)$$

Для кожного  $j$ -го споживача формується множина підрозділів розвідки повітряного противника, що здатні забезпечити його вимоги:

$$S_j = \{r_i \in R | a_{ij} = 1\} \quad (6)$$

Відповідно, легенда матриці набуває вигляду:

1. Якщо  $|S_j| = 0$ : – задача не має рішення при наявних ресурсах. Необхідно знизити вимоги споживачів, або запросити резерв;
2. Якщо  $|S_j| = 1$ : – рішення детерміноване. Визначається єдиний можливий підрозділ розвідки повітряного противника;
3. Якщо  $|S_j| \geq 1$ : – наявна множина підрозділів розвідки повітряного противника.

В субблоці 5.2 визначаються варіанти оперативної побудови СРПП в наступальній

операції. Для цього необхідно з множини  $S_j$ , визначити підрозділи СРПП для забезпечення виконання завдань  $j$  споживачем відповідно до варіанту ведення наступальної операції. Після визначаються позиції визначених підрозділів розвідки за критерієм забезпечення потрібних рубежів виявлення для видачі інформації про повітряного противника.

$$D_{ip}^{реал} \geq B_{Dj}(t) \quad (7)$$

В субблоці 5.3 визначаються варіанти способів застосування підрозділів СРПП. Для цього необхідно для кожного  $i$ -го підрозділу розвідки повітряного противника з множин  $S_j$ , розрахувати показник оперативності  $T_{ij}$ . Цей показник, характеризується часом, який необхідно витратити підрозділу розвідки повітряного противника для здійснення маневру на визначену позицію для виконання завдань ведення розвідки та видачі інформації про повітряного противника, відповідно до варіанту ведення наступальної операції, який розраховується за формулою:

$$T_{ij} = t_{згорти} + \frac{S_{ij}}{V_k} + t_{розг} \quad (8)$$

- де  $t_{згорти}$  – загальна кількість підрозділів розвідки у складі СРПП;
- $S_{ij}$  – загальна кількість споживачів інформації згідно з варіантом дій ОУВ;
- $V$  – середня швидкість руху колони даного типу техніки;
- $k$  – коефіцієнт прохідності (погода, тип покриття, затори);
- $t_{розг}$  – час на розгортання  $i$ -го підрозділу розвідки повітряного противника.

Після визначаються позиції визначених підрозділів розвідки за критерієм мінімального часу розгортання та нарощування поля розвідки повітряного противника. Для цього необхідно побудувати матрицю призначень:  $X = \|x_{ij}\|$ , де матриця має розмір  $R \times S$ , де:  $R$  – загальна кількість підрозділів розвідки у складі СРПП;  $S$  – визначені позиції для підрозділів розвідки повітряного противника;  $T_{ij}$  – показник оперативності.

Таблиця 2

**Матриця визначення позицій підрозділів розвідки за обраним критерієм**

$i \backslash j$	1	2	3	...	$S$
1	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	...	$T_{1s}$
2	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{23}$	...	$T_{2s}$
3	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{33}$	...	$T_{3s}$
...	...	...	...	...	...
$R$	$T_{R1}$	$T_{R2}$	$T_{R3}$	...	$T_{RS}$

Черговість змін вимог споживачів визначає послідовність руху підрозділів розвідки повітряного противника.

Визначення варіантів способу функціонування СРПП в наступальній операції працює при наступній системі обмежень:

1. Кожен підрозділ може бути призначений лише на одну позицію (або залишитись у резерві):

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1, \forall i \quad (9)$$

2. Кожна критично важлива позиція повинна бути зайнята:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, \forall i \in P \quad (10)$$

3. Підрозділ повинен прийти до часу “Ч”  $T_{lim}$ :

$$x_{ij} T_{ij} \leq T_{limj} \quad (11)$$

Якщо  $T_{ij} \geq T_{lim}$ , то цей варіант відкидається.

В блоці 6 за допомогою удосконаленої моделі проводиться моделювання процесу її функціонування за визначеними варіантами ведення наступальної операції ( $k = 1; K$ ) та розраховується показник оцінювання ефективності функціонування СРПП в наступальній операції  $M_{вид}$ , а саме: математичне сподівання кількості цілей, що приймають участь в ударі, інформація по яким видана споживачам з необхідною якістю за удар. Розраховується за формулою:

$$M_{вид}(t) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{N_k} (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_{в,j}^n(t) \cdot P_{нар}^{св}(t)))) \cdot P_{вид}^{зт}(t) \quad (12)$$

- де  $P_{в,j}^n(t)$  – імовірність всечасного ведення розвідки повітряного противника ведення;
- $P_{вид}^{зт}(t)$  – імовірність своєчасної видачі інформації заданої точності;
- $P_{нар}^{св}(t)$  – імовірність своєчасного нарощування поля розвідки повітряного противника;
- $L$  – піддіапазон висот цілей;
- $N_k$  – кількості цілей у  $k$ -ому піддіапазоні висот.

В блоці 7 розраховуються значення показників ефективності функціонування СРПП за визначеними варіантами ( $E_k$ ):

$$E_k = \frac{M_{вид}(t)}{N_{зпн}(t)} \quad (13)$$

В блоці 8 здійснюється критеріальна порівняння отриманого значення показника ефективності варіанта функціонування СРПП в наступальній операції з його потрібним значенням.

При незадоволені умови критерію оцінювання показника ефективності варіанта функціонування СРПП, у блоці 9 аналізуються причини невідповідності, здійснюється корегування вихідних даних і цикл повторюється.

В блоці 10 при задоволені умови оцінювання ефективності варіанта функціонування СРПП проводиться формування бази варіантів функціонування СРПП за варіантом дій ОУВ в наступальній операції.

В блоці 11 відбувається вибір кращого варіанту функціонування СРПП за критерієм максимальності показника оцінювання ефективності.

### Обговорення

В ході планування та проведення наступальної операції ситуаційна обізнаність про дії повітряного противника та свою авіацію є критично важливою. Для забезпечення ситуаційної обізнаності силам і засобам СРПП визначаються відповідні вимоги до якості інформації, яку необхідно видати споживачам.

Проте, сучасним наступальним операціям притаманний високий рівень невизначеності вимог споживачів до інформації про ПП, що визначає складність обґрунтування прийнятих рішень на застосування військ, в тому числі і СРПП. Це є одним з ключових проблемних питань забезпечення ефективного використання сил та засобів СРПП для досягнення мети наступальної операції.

Для визначення шляхів вирішення цієї проблеми необхідно застосовувати відповідний науково-методичний апарат. Проте, аналіз існуючого науково-методичного апарату дозволив зробити висновок, що існуючі методики не враховують особливості функціонування системи розвідки повітряного противника в наступальній операції.

У статті розкриті основні положення удосконаленої методики оцінювання ефективності функціонування СРПП в наступальній операції, яка, на відміну від існуючих, дозволяє оцінити ефективність функціонування СРПП з урахуванням: постійної зміни вимог споживачів інформації про повітряного противника в залежності від розвитку наступальної операції; варіантів функціонування СРПП в залежності від варіантів дій оперативного угруповання військ в наступальній операції; проведення інженерної розвідки і розмінування шляхів висунання та позицій пунктів управління та підрозділів, що входять до складу СРПП.

### Висновки

Таким чином, використання запропонованої удосконаленої методики дозволить оцінити ефективність функціонування СРПП в наступальній операції з урахуванням більшої кількості факторів, які притаманні сучасній наступальній операції оперативного угруповання військ. Це дозволить забезпечити більш якісну підготовку військ (сил) до проведення наступальних операцій. При цьому в методиці вимоги споживачів, що змінюються в залежності від розвитку наступальної операції визначається

частковою методикою. Варіанти способу функціонування СРПП визначаються за допомогою матриць відповідностей, показник оцінювання ефективності визначається за допомогою удосконаленої моделі функціонування СРПП.

Матеріали статті можуть бути використані фахівцями оперативної і тактичної ланки управління, які здійснюють планування застосування сил і засобів розвідки повітряного противника в операціях.

### Список використаних джерел

- [1.] Доктрина "Повітряні Сили Збройних Сил України". Вінниця, Україна: Командування ПС ЗС України, 2020.
- [2.] А. Я. Торпчин та ін., Довідник з протиповітряної оборони. Київ, Харків, Україна: МО України, ХВУ, 2003.
- [3.] МО України, ГШ ЗС України, ЦДВІ ЗС України, Воєнно-історичний опис російсько-української війни: грудень 2023 року. Київ, Україна, 2024.
- [4.] І. С. Романченко, О. М. Загорка, С. Г. Бутенко та О. В. Дейнега, Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони). Житомир, Україна, 2011.
- [5.] В. П. Городнов, Г. А. Дробаха, М. О. Єрмошин, Є. Б. Смірнов та В. І. Ткаченко, Моделювання бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони та інформаційне забезпечення процесів управління ними (теорія, практика, історія розвитку). Харків, Україна: ХВУ, 2004.
- [6.] П. М. Сніцаренко, С. В. Лапицький, А. А. Гульятєв, О. О. Головін та А. Ю. Гупало, Теорія озброєння. Науково-технічні проблеми та завдання. Військові системи дистанційного моніторингу навколишнього простору щодо рухомих об'єктів: методологічні аспекти обґрунтування вимог, т. 3. Київ, Україна: Видавничий дім Дмитра Бураго, 2016.
- [7.] О. В. Пуховий, С. Е. Попов та І. О. Дворніченко, "Методика оцінювання ефективності радіолокаційної розвідки," Повітряна міць України, № 2(3), с. 24–28, 2022.
- [8.] С. В. Поліщук та С. Ю. Гогоняц, "Загальні положення удосконаленої методики оцінки ефективності радіолокаційного забезпечення бойових дій угруповання сил і засобів протиповітряної оборони," Наука і техніка Повітряних Сил, № 4(25), с. 70–73, 2016.
- [9.] В. Г. Малюга та І. В. Гурєєв, "Методика формування системи радіолокаційної розвідки, адаптивної до змін обстановки в умовах ресурсних обмежень," Наука і техніка Повітряних Сил, № 1(50), с. 88–92, 2023.
- [10.] С. П. Ярош, Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони. Харків, Україна: ХУПС, 2012.
- [11.] Г. В. Худов та ін., Тактика радіотехнічних військ, Г. В. Худов, Ред. Харків, Україна: ХНУПС, 2018.

**Mykola Verovok**

<https://orcid.org/0009-0001-9932-3074>

**Serhii Polishuk** (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-9050-6918>

*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## **IMPROVED METHODOLOGY FOR EVALUATING THE OPERATIONAL EFFECTIVENESS OF THE AERIAL THREAT RECONNAISSANCE SYSTEM IN AN OFFENSIVE OPERATION**

*One of the primary measures conducted during the preparation for an offensive operation is combat employment planning, which results in the selection of an operational variant for the aerial threat reconnaissance system. The operational variant of the aerial threat reconnaissance system is determined based on the outcomes of modeling and evaluating several alternative variants.*

*The article presents an improved methodology for evaluating the operational effectiveness of the aerial threat reconnaissance system in an offensive operation. Unlike existing approaches, it allows for determining the course of action for the employment of the system's forces and assets under conditions of uncertainty regarding the requirements of aerial threat intelligence consumers. The methodology enables the evaluation of the system's operational effectiveness by accounting for factors inherent to offensive operations, specifically: the necessity of conducting engineer reconnaissance and mine clearance along the routes of advance and at the positions of the aerial threat reconnaissance units.*

*The application of this methodology ensures well-grounded command decision-making during combat employment planning in the course of an offensive operation.*

*The research results can be integrated into the workflows of military command and control (C2) bodies for specialists at the operational and tactical levels of command who are responsible for planning the employment of aerial threat reconnaissance forces and assets during operations.*

**Keywords:** *operational model; effectiveness; aerial threat reconnaissance system; effectiveness evaluation; system operation; performance indicator.*

### **References**

- [1.] Doctrine "Air Forces of the Armed Forces of Ukraine". Vinnytsia, Ukraine: Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, 2020. (in Ukrainian)
- [2.] A. Ya. Toropchyn et al., Air Defense Handbook. Kyiv, Kharkiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, Kharkiv Military University, 2003. (in Ukrainian)
- [3.] Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Central Military Scientific Institute of the Armed Forces of Ukraine, Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War: December 2023. Kyiv, Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [4.] I. S. Romanchenko, O. M. Zahorka, S. H. Butenko, and O. V. Deineha, Theory and Practice of Combating Small-Sized Low-Flying Targets (Capability Assessment, Development Trends of Air Defense Systems). Zhytomyr, Ukraine, 2011. (in Ukrainian)
- [5.] V. P. Horodnov, H. A. Drobakha, M. O. Yermoshyn, Ye. B. Smirnov, and V. I. Tkachenko, Modeling of Air Defense Troops (Forces) Combat Operations and Information Support of Their Control Processes (Theory, Practice, History of Development). Kharkiv, Ukraine: Kharkiv Military University, 2004. (in Ukrainian)
- [6.] P. M. Snitsarenko, S. V. Lapytskyi, A. A. Hultiaiev, O. O. Holovin, and A. Yu. Hupalov, Armament Theory. Scientific and Technical Problems and Tasks. Military Systems of Remote Monitoring of the Surrounding Space Regarding Moving Objects: Methodological Aspects of Requirements Justification, vol. 3. Kyiv, Ukraine: Dmytro Buraho Publishing House, 2016. (in Ukrainian)
- [7.] O. V. Pukhovyi, S. E. Popov, and I. O. Dvornichenko, "Methodology for evaluating the effectiveness of radar reconnaissance," *Air Power of Ukraine*, no. 2(3), pp. 24–28, 2022. (in Ukrainian)
- [8.] S. V. Polishchuk and S. Yu. Hohoniants, "General provisions of the improved methodology for evaluating the effectiveness of radar support for combat operations of an air defense forces and means grouping," *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, no. 4(25), pp. 70–73, 2016. (in Ukrainian)
- [9.] V. H. Maliuha and I. V. Hurieiev, "Methodology of forming a radar reconnaissance system adaptive to changes in the situation under resource constraints," *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, no. 1(50), pp. 88–92, 2023. (in Ukrainian)
- [10.] S. P. Yarosh, Theoretical Foundations of the Construction and Application of Reconnaissance-Control Information Systems of Air Defense. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National Air Force University, 2012. (in Ukrainian)
- [11.] H. V. Khudov et al., Tactics of Radio-Technical Troops, H. V. Khudov, Ed. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National Air Force University, 2018. (in Ukrainian)

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-35-41**

**УДК 623.746.8**

**Печененко Олег Михайлович**

**<https://orcid.org/0009-0008-9925-3089>**

**Національний університет оборони України, Київ, Україна**

*Рукопис надійшов до редакції: 05.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗПОДІЛУ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ МІЖ ПЛОТОВАНОЮ ТА БЕЗПЛОТНОЮ АВІАЦІЄЮ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ З АВІАЦІЙНОГО ПРИКРИТТЯ**

*В умовах сучасних збройних конфліктів масове застосування противником засобів повітряного нападу різних типів вимагає концептуально нових підходів до організації підсистеми авіаційного прикриття в системі протиповітряної оборони, а особливо перегляду існуючих алгоритмів цілерозподілу. Традиційні засоби (винищувачі, наземні комплекси ППО) за досвідом російсько-української війни є критично перевантаженими, що зумовлює необхідність спільного залучення пілотованої та безпілотної авіації. Існує гостра потреба у зміні підходів до протидії засобам повітряного нападу противника: від класичної задачі максимізації шкоди до задачі мінімізації вартості перехоплення за умови виконання вимог критерію відбиття нальоту. Метою дослідження є удосконалення методики розподілу повітряних цілей, яка дозволить під час цілерозподілу враховувати ефективність застосування безпілотної літальної авіації та вертольотів. Математичний апарат, що використовується у статті ґрунтується на методах цілочисельного динамічного програмування. У роботі описано покроковий алгоритм цілерозподілу із застосуванням методу гілок і меж, який гарантовано знаходить глобальний оптимум для цілочисельних задач, а також враховує просторово-часові обмеження. Дослідження довело, що на масовані удари дешевими безпілотною літальними апаратами алгоритм автоматично призначає безпілотної літальні апарати – перехоплювачі та вертольоти, зберігаючи ресурс винищувачів та авіаційних засобів ураження для перехоплення крилатих ракет.*

**Ключові слова:** російсько-українська війна; протиповітряна оборона; засоби повітряного нападу; авіаційне прикриття; безпілотні літальні апарати; БпЛА-перехоплювач; планування; цілерозподіл; ефективність; бойові дії.

### **Вступ**

Досвід сучасних бойових дій та протиповітряної оборони (ППО) [1,2], особливо російсько-української війни демонструє масове застосування противником дешевих ударних безпілотної літальної авіації (БпЛА) та дорогих крилатих ракет, що створює значне навантаження на систему ППО [3]. Традиційні засоби (винищувальна авіація, зенітні ракетні війська та підрозділи ППО Сухопутних військ) виявляються критично перевантаженими. Особливо гостро ця проблема постає під час протидії роям різнотипних ударних безпілотної літальної авіації, що вимагає залучення адаптивних алгоритмів та елементів штучного інтелекту [4]. Це зумовлює об'єктивну необхідність залучення до завдань авіаційного прикриття в ППО альтернативних засобів, таких як вертольоти та БпЛА-перехоплювачі.

Ключовою проблемою є перевантаження підсистеми авіаційного прикриття під час масованих атак засобів повітряного нападу (ЗПН), таких як розвідувальні і ударні дрони, вертольоти, літаки та крилаті ракети противника, що вимагає залучення різних засобів протидії, а саме спільного бойового застосування пілотованої та безпілотної авіації.

### **Матеріали та методи**

Проведемо порівняльний аналіз математичного апарату існуючого алгоритму цілерозподілу та запропонованої методики. Згідно з існуючим математичним описом алгоритму призначення винищувачів, при кожному підключенні алгоритму на кожну з обслуговуваних цілей призначається лише по одній дії [3]. Якщо дія не забезпечує необхідного вогневого впливу ціль знову надходить на обслуговування лише в наступних циклах. Вибір дії здійснюється за правилом: якщо максимальна ймовірність більша чи рівна заданій то слідує її призначення. Така логіка неминуче призводить до того, що на масову дешеву ціль алгоритм цілерозподілу призначить найдорожчий винищувач, просто тому що його ймовірність успіху є найвищою. На відміну від методів повного перебору, використання сучасних методів дослідження операцій та розв'язання задач оптимізації дозволяє гарантовано знайти глобальний оптимум, відскакуючи заздалегідь програшні варіанти [7,10]. Існуючі математичні моделі управління вогнем (наприклад, градієнтний метод максимального елемента) орієнтовані переважно на максимізацію математичного сподівання втрат, що завдаються противнику та не враховують вартість самого перехоплення [5,6].

Згідно з цим алгоритмом, на кожному кроці черговий засіб призначається на ту ціль, яка дає максимальний приріст цільової функції. Це призводить до швидкого виснаження дорогого боєкомплекту винищувальної авіації під час відбиття масованих нальотів, тому вирішення задачі призначення пілотованих та безпілотних апаратів при спільному застосуванні потребує концептуально нових підходів [7].

Враховуючи зазначене вище виникає необхідність удосконалити існуючу методику цілерозподілу для отримання більш точних результатів розрахунку та спростити процедуру прийняття рішення командувача та штабу на застосування авіаційної складової в системі ППО.

Метою дослідження є удосконалення методики розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією, яка дозволить проводити розрахунки щодо мінімізації витрат наявних ресурсів з урахуванням економічних та просторово-часових обмежень [8].

### Результати

Математична постановка задачі зводиться до моделі цілочисельного лінійного програмування. Завдання належить до класу задач дискретного програмування, підкласом якого є задачі цілочислового програмування, де змінні  $x_{ij} \in \{0,1\}$ . Нехай система ППО оперує засобами ураження (де  $i=1..N$ ), які включають як пілотовану (винищувачі, вертольоти), так і безпілотну (БПЛА-перехоплювачі) авіацію. В свою чергу система розвідки виявила деяку кількість (де  $j=1..M$ ) ЗПН противника, які включають БПЛА, вертольоти, літаки та крилаті ракети (КР).

Цільова функція мінімізації сумарних витрат на перехоплення залучених засобів авіації в ППО матиме вигляд:

$$L(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} \cdot X_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $C_{ij}$  – оцінка витрат застосування  $i$ -го засобу по  $j$ -й цілі;

$X_{ij}$  – змінна призначення  $i$ -го засобу на  $j$ -ту ціль.

**Визначимо систему обмежень:** По-перше, згідно з принципами планування вогню ППО, необхідно забезпечити ураження цілей так, щоб сумарна ймовірність знищення  $P_{\Sigma}$  була більшою чи рівною за задану:

$$P_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{ij})^{X_{ij}} \geq P_{\text{визн}}^{(j)}, \quad (2)$$

де  $P_{ij}$  – ймовірність знищення цілі одним конкретним засобом;

$P_{\text{визн}}^{(j)}$  – визначена ймовірність знищення.

По-друге, вводиться просторово-часове обмеження для уникнення “дружнього вогню”.

Для розв'язання цієї задачі розроблено удосконалений алгоритм, що базується на комбінаторному методі гілок і меж [11,13,14]. На відміну від методів повного перебору чи простих евристик, цей підхід поєднує математичну точність із розумним відсіканням, що дозволяє гарантовано знайти глобальний оптимум, не витрачаючи обчислювальні ресурси на перевірку завідомо програшних варіантів. Він ідеально підходить для задач цілерозподілу із цілочисельними обмеженнями (де неможливо виділити для перехоплення дробову частину засобу), перед якими класичні методи лінійного програмування стають безсилими [11], в свою чергу підвищує ефективність ППО. На рис. 1 представлена блок-схема запропонованої удосконаленої методики розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття у протиповітряній обороні.

Покроковий алгоритм удосконаленої методики розподілу пілотованої та безпілотної авіації в ППО реалізує логіку методу гілок і меж [14], через механізм нарощування зусиль та зміну класу зброї в ешелоні. Процес повторюється для кожної ідентифікованої цілі.

**Крок 1. Введення вихідних даних (оцінка обстановки).** Здійснюється зчитування параметрів масиву наявного складу сил та засобів авіації в системі ППО, очікуваної (прогнозованої) кількості ЗПН противника, а також задається показник потрібної ймовірності ППО [15]. Додатково фіксуються поточні метеоумови та час доби.

**Крок 2. Уточнення можливостей та ешелонування засобів.** Виконується розрахунок реальних ймовірностей ураження з урахуванням погоди:

$$P_{ij}^{(\text{реал})} = P_{ij}^{(\text{база})} \cdot k, \quad (3)$$

де  $P_{ij}^{(\text{база})}$  – еквівалент базової (мінімально потрібної) ймовірності знищення;

$k$  – понижуючий коефіцієнт впливу умов середовища (день/ніч, метеоумови).

Далі застосовується економічний критерій: усі наявні засоби ураження пілотованої та безпілотної авіації розподіляються в ешелони за принципом зростання вартості їх застосування:

$$C_j \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $C_j$  – вартість  $j$ -го засобу знищення (від БПЛА до винищувача);

Алгоритм коригує ймовірності ураження з огляду на обстановку та пикує (ешелонує) доступні засоби авіації віддаючи пріоритет найдешевшим засобам (БПЛА-перехоплювачам) при атаці цілей, котрі здійснюють польоти на малих висотах і швидкостях (типу БПЛА), після перебору варіантів відбувається призначення наступного засобу при відмові першого чергового засобу.

**Крок 3. Ідентифікація типу ЗПН та вибір раціонального засобу ураження.** Для кожної конкретної вибраної цілі алгоритм визначає її тип.

Далі накладається тактична “матриця допусків”. Залежно від швидкісних та висотних характеристик цілі (КР, літак, вертоліт, БПЛА), система фільтрує

доступні класи зброї, відсікаючи завідомо неефективні або заборонені варіанти (наприклад, заборона використання БПЛА по КР).

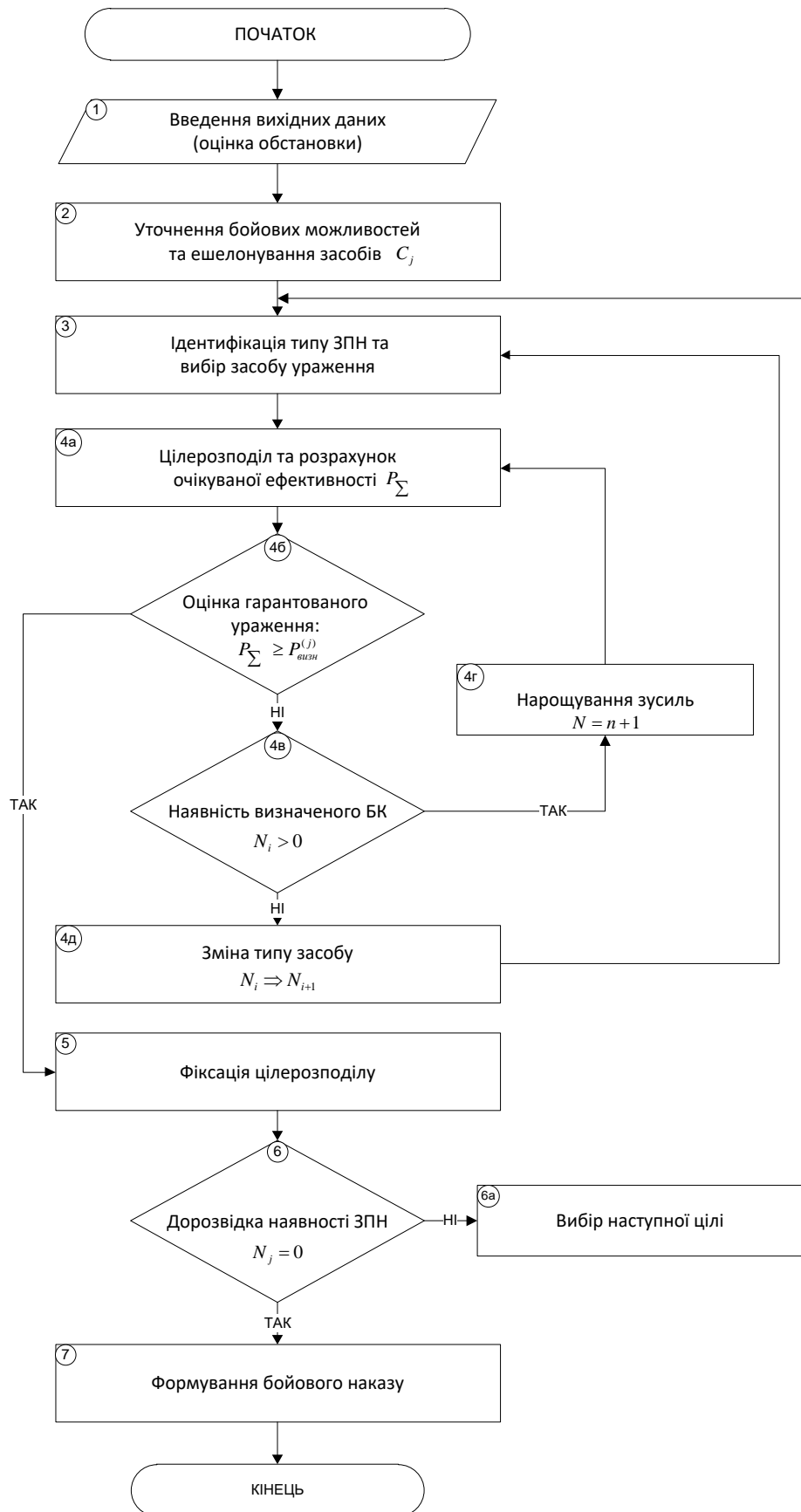


Рисунок 1 – Блок-схема удосконаленої методики розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття

**Крок 4а. Цілерозподіл та розрахунок очікуваної ефективності.** Алгоритм віртуально (в пам'яті системи) призначає одну одиницю найдешевшого з дозволених засобів на обрану ціль. Виконується розрахунок сумарної ймовірності ураження ( $P_{\Sigma}$ ) за формулою незалежних подій (2).

**Крок 4б. Оцінка гарантованого ураження.** Ключовий вузол прийняття рішення. Система перевіряє виконання нерівності:

$$P_{\Sigma} \geq P_{\text{визн}}^{(j)} \quad (5)$$

*Якщо умова виконується (ТАК):* алгоритм вважає, що виділених засобів достатньо, відбувається перехід до Кроку 5.

*Якщо умова не виконується (НІ):* алгоритм розуміє, що треба посилити вогневий вплив і переходить до перевірки залишку боекомплекту. поточного засобу і відбувається перехід на Крок 4в.

**Крок 4в. Перевірки БК.** Перевірка наявності на балансі обраного типу засобу  $N_i > 0$ .

*Якщо умова виконується (ТАК):* **Крок 4г.** Відбувається **нарощування зусиль**, алгоритм виділяє та додає ще одну одиницю цього ж засобу (наприклад, другий БпЛА на ту ж ціль) і повертається до Кроку 4а для перерахунку  $P_{\Sigma}$ .

*Якщо умова не виконується (НІ):* **Крок 4д.** Відбувається **зміна типу засобу ураження**, якщо ліміт дешевого засобу вичерпано, а ціль не досягла  $P_{\text{визн}}^{(j)}$ , алгоритм скасовує попередні віртуальні призначення, повертаючи БК на баланс. Відбувається перехід до наступного в ешелоні (потужнішого/дорожчого) засобу, після чого процес повертається на Крок 4а.

**Крок 5. Фіксація цілерозподілу.** При досягненні заданої ймовірності  $P_{\text{визн}}^{(j)}$  віртуальний розподіл переводиться у статус остаточного. БК безповоротно списується з балансу. Програма переходить до наступного кроку.

**Крок 6. Дорозвідка наявності ЗПН.** Якщо в системі залишилися цілі, які не були визначені до ураження, алгоритм має здійснити вибір наступного ЗПН  $N_i$  з черги до повного опрацювання всіх цілей ( $N_i = 0$ .) для успішного виконання завдань ППО.

*Якщо умова не виконується (НІ):* **Крок 6а.** Алгоритм здійснює вибір наступної цілі, повертаючись на Крок 3 для обробки нового ЗПН.

*Якщо умова виконується (ТАК):* **Крок 6б.** Усі цілі розподілені, основний цикл оптимізації завершено, перехід до фінального етапу.

**Крок 7. Формування бойового наказу.** Система генерує фінальну матрицю цілерозподілу, яка містить чіткі цілевказівки для пілотованої та безпілотної авіації. Ця матриця є основою для автоматизованої видачі бойових наказів розрахункам та екіпажам. Завершення роботи алгоритму.

Для перевірки удосконаленої методики цілерозподілу щодо ефективності системи ППО було проведено обчислювальний експеримент, який моделював відбиття засобами пілотованої та безпілотної авіації змішаного масованого нальоту. У ході моделювання класичний метод, орієнтований виключно на максимізацію завданої шкоди, алгоритмічно спрямував винищувачі на найближчі виявлені цілі, включно з низьковисотними та низькошвидкісними ударними БпЛА противника. Існуючий алгоритм виділяє лише одну дію за цикл. Це закономірно призвело до швидкого та нераціонального вичерпання високовартісного боекомплекту ракетного озброєння. В свою чергу під час моделювання при застосуванні методу гілок і меж (рис.2) дозволяє оптимізатору в першу чергу застосовувати дешеві засоби та відсікати використання винищувачів по масових цілях до знищення першочергових цілей [8].

На рис.2а показано розподіл наявних засобів по цілях (де спочатку застосували дешеві засоби по БпЛА противника, а винищувачі – лише КР), де здійснено оптимальний розподіл та показано залишок АЗУ що вдалося заощадити.

На рис.2б показано розподіл наявних засобів по цілях (де кількість цілей більша за наявних засобів) оптимальний розподіл забезпечив максимальну кількість знищених засобів для виконання визначеного завдання ППО. Застосування винищувачів по дешевих цілях типу БпЛА відбулося лише після закінчення БК дешевих засобів, з метою виконання отриманого завдання.

Натомість удосконалена методика в межах одного робочого циклу відразу призначає до першої пріоритетної групи вертольоти та БпЛА-перехоплювачі, що працюватиме по низьковисотних та низькошвидкісних цілях, доки сумарна ймовірність не задовольнить вимогу, або замінює засіб що не спроможний гарантовано забезпечити необхідну надійність оборони на рівні  $P_{\Sigma} \geq 0,85$ . Відповідно винищувачі були алгоритмічно відсічені від виконання завдань по низьковисотних та низькошвидкісних цілях і безальтернативно розподілені виключно на перехоплення КР. Винищувачі потрапляють до першої групи виключно після атаки крилатих ракет. Завдяки такому раціональному делегуванню завдань, загальні фінансові витрати на дорого вартісний боекомплект скоротилися майже в 2 рази порівняно з класичним підходом. Крім того, додано підпрограму динамічного просторового балансування, яка на етапі призначення дії розмежовує зони роботи засобів завдяки розрахунку оптимальних просторових областей  $\Delta R_{\text{опт}}$ , що звело ризик виникнення “дружнього вогню” до мінімуму [10].

МАТРИЦЯ РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ			
ID цілі	Тип (КР або Дрон)		
1	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
2	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
3	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
4	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
5	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
6	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
7	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
8	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
9	КР	0,9	F-16 (1 шт);
10	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
11	КР	0,9	F-16 (1 шт);
12	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
13	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
14	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
15	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
16	КР	0,9	F-16 (1 шт);
17	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
18	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
19	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
20	КР	0,9	F-16 (1 шт);
21	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
22	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
23	КР	0,9	F-16 (1 шт);
24	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
НАЗВА ЗАСОБУ		ВИТРАЧЕНО	ЗАЛИШОК
F-16		6	10
Merops		20	0
Mi-8		16	0

а – при достатній кількості засобів;

МАТРИЦЯ РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ			
ID цілі	Тип (КР або Дрон)		
1	КР	0,9	F-16 (1 шт);
2	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
3	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
4	КР	0,9	F-16 (1 шт);
5	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
6	КР	0,9	F-16 (1 шт);
7	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
8	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
9	КР	0,9	F-16 (1 шт);
10	БпЛА	0,98	Merops (1 шт); Merops (1 шт);
11	КР	0,9	F-16 (1 шт);
12	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
13	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
14	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
15	БпЛА	0,91	Mi-8 (1 шт); Mi-8 (1 шт);
16	КР	0,9	F-16 (1 шт);
17	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
18	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
19	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
20	КР	0,9	F-16 (1 шт);
21	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
22	БпЛА	0,9	F-16 (1 шт);
23	КР	0	Недостатньо засобів (БК вичерпано)
24	БпЛА	0	Недостатньо засобів (БК вичерпано)
НАЗВА ЗАСОБУ		ВИТРАЧЕНО	ЗАЛИШОК
F-16		12	0
Merops		12	0
Mi-8		8	0

б – при недостатній кількості засобів;

**Рисунок 2** – Результат обчислювального експерименту, який моделював відбиття засобами пілотованої та безпілотної авіації змішаного масованого нальоту ЗПН противника.

### Обговорення

Традиційні базові алгоритми цілерозподілу демонструють задовільні результати здебільшого в умовах управління однорідними засобами ППО. Однак, як засвідчив аналіз, при існуючому застосуванні пілотованої та безпілотної авіації такий підхід виявляється тактично та економічно невигідним. Отриманий у ході дослідження науковий результат переконливо доводить, що інтеграція методу гілок і меж для призначення засобів пілотованої та безпілотної авіації дозволяє системі миттєво створювати необхідну щільність вогню за рахунок залучення всіх наявних засобів за побудованими ешелонами [5,13]. Важливою перевагою цього методу є те, що він ефективно розв'язує математичну проблему вибору між нереалістичними частковими (дробовими) варіантами застосування авіації, генеруючи чіткий та однозначний цілочисельний план розподілу пілотованої та безпілотної авіації відповідно до ступеня загрози ЗПН.

Разом з тим, необхідно відзначити певні обмеження розробленої моделі, які насамперед пов'язані з детермінованістю вхідних даних. У реальній бойовій обстановці базові ймовірності ураження повітряних цілей можуть динамічно та непередбачувано знижуватися під інтенсивним впливом ворожих засобів радіоелектронної боротьби. За таких умов конфліктної невизначеності доцільним вбачається перехід до інструментарію теорії матричних ігор. Застосування змішаних або мінімакських стратегій дозволить системі гарантувати прийнятний результат цілерозподілу навіть у найгірших умовах активної протидії противника, що може стати предметом наступних наукових досліджень.

### Висновки

У статті удосконалено методику розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною

авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття. Удосконалена методика, на відміну від існуючих, що орієнтовані переважно на максимізацію завданої шкоди, використовує метод гілок і меж та враховує показник економічної вартості  $C_j$  кожного засобу при перехопленні та базується на зміні підходів до цілерозподілу в бік мінімізації сумарних витрат критично важливих ресурсів за умови досягнення заданої ймовірності ураження. Проведене моделювання процесу цілерозподілу в умовах масованого змішаного нальоту переконливо доводить перевагу удосконаленого алгоритму над прямолінійною стратегією застосування винищувачів. Головним здобутком нової методики є підвищення економічної ефективності застосування засобів протиповітряної оборони. Це досягається завдяки суворому ранжуванню ресурсів за критерієм мінімальної вартості, що унеможливує нераціональне витрачання дорогих авіаційних чи зенітних ракет на дешеві безпілотики. Дослідження показали здатність системи генерувати раціональний цілочисельний план бою: алгоритм автоматично призначає на масові загрози типу БпЛА відносно дешеві засоби пілотованої (вертольоти) та безпілотної (БпЛА-перехоплювачі) авіації і лише потім більш дорогі засоби при цьому гарантовано зберігаючи озброєння винищувачів для перехоплення складніших цілей, таких як КР. І тільки після вичерпання всіх дешевих засобів, відбувається призначення дорогих (винищувачів) можуть бути розподілені на дешеві цілі. Крім того, інтеграція обмежень на просторово-часові характеристики унеможливує виникнення “дружнього вогню”. Таким чином, удосконалена методика послідовного нарощування зусиль максимізує ймовірність збереження об'єктів прикриття при експоненційному зменшенні вартості бою, що робить її оптимальною для

впровадження в сучасні автоматизовані системи управління військами. У підсумку, практичне впровадження розробленої методики дозволяє уникнути виснаження ресурсів системи ППО та скорочує витрати високовартісного БК авіації майже вдвічі.

Удосконалена методика розподілу повітряних цілей між пілотованою та безпілотною авіацією під час виконання завдань з авіаційного прикриття буде корисною для органів військового управління при плануванні та проведенні розрахунків необхідних засобів.

### Список використаних джерел

- [1.] О. Титаренко та Є. Власенко, "Протиповітряна оборона в російсько-українській війні: уроки та рекомендації," Повітряна міць України, т. 1, № 6, с. 49–55, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-49-55>.
- [2.] О. Головаченко, "Тенденції ведення збройної боротьби армією Російської Федерації – дослідження через призму контент-аналізу," Грааль науки, № 7, с. 122–124, 2021, <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.08.2021.020>.
- [3.] Б. Ж. Шкурат, "Методика динамічного розподілу ресурсів у спільних діях наземних і повітряних засобів протиповітряної оборони," Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, № 2(47), с. 147–154, 2023, <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-147-154>.
- [4.] І. І. Шовкошитний та О. А. Василенко, "Управління цілерозподілом рою різнотипних ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей на основі адаптивного алгоритму з використанням методів оптимізації та елементів штучного інтелекту," Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, вип. 3(54), с. 15–24, 2025, <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-54-3-15-24>.
- [5.] В. І. Грабчак, В. М. Супрун та Ю. С. Бистрик, "Математична модель оптимального розподілу засобів ураження," Військово-технічний збірник, вип. 1(10), с. 16–23, 2014.
- [6.] С. М. Телюков, С. В. Гузченко, І. А. Таран та Г. А. Злипка, "Методика визначення оптимального розподілу протитанкових засобів для знищення броньованих цілей противника при плануванні вогневих засідок в оборонному бою," Системи озброєння і військова техніка, вип. 3(55), с. 44–50, 2018.
- [7.] Г. А. Шелудько, В. В. Науменко та О. О. Стрельнікова, Методи розв'язання задач оптимізації: Конспект лекцій. Харків, Україна: УкрДАЗТ, 2014.
- [8.] М. А. Гринченко та М. О. Чернишова, "Технологія розподілу ресурсів у проєкті між виконавцями," Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, вип. 58, с. 155–166, 2013.
- [9.] В. Д. Романенко, Теорія ігор: Навчальний посібник. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
- [10.] П. В. Северілов та К. І. Гула, "Моделі оптимального розподілу ресурсів у вертикально інтегрованій системі," Вісник Вінницького політехнічного інституту, вип. 6, с. 41–46, 2008.
- [11.] О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик та Т. О. Луценко, "Алгоритм оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами," Проблеми надзвичайних ситуацій, вип. 2(38), с. 181–193, 2023.
- [12.] NATO, AJP-3.3: Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations. Brussels, Belgium: NATO Standardization Office.
- [13.] Я. Б. Сікора, А. Й. Щехорський та Б. Л. Якимчук, Методи оптимізації та дослідження операцій. Житомир, Україна: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2019.
- [14.] Г. П. Донець та Л. М. Колечкіна, Екстремальні задачі на комбінаторних конфігураціях: монографія. Полтава, Україна: РВВ ПУЕТ, 2011.
- [15.] Генеральний штаб Збройних Сил України, Тимчасова штабна методика оцінювання ефективності протиповітряної оборони України, затв. наказом ГШ ЗСУ від 27.06.2019 № 232/дск. Київ, Україна: ГШ ЗСУ, 2019.

Oleh Pechenko

<https://orcid.org/0009-0008-9925-3089>

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## ENHANCED METHODOLOGY FOR DISTRIBUTION OF AIR TARGETS BETWEEN MANNED AND UNMANNED AVIATION DURING AIR COVER MISSIONS

*In the context of modern armed conflicts, the mass use by the enemy of various types of air attack means requires conceptually new approaches to organizing the aviation cover subsystem in the air defense system, and especially a revision of existing target distribution algorithms. Traditional means (fighters, ground-based air defense systems) according to the experience of the Russian-Ukrainian war are critically overloaded, which necessitates the joint use of manned and unmanned aviation. There is an urgent need to change approaches to countering the enemy's air attack means: from the classic task of maximizing damage to the task of minimizing the interception cost while meeting the requirements of the raid repulsion criterion. The purpose of the study is to improve the methodology for distributing air targets, which will allow taking into account the effectiveness of using unmanned aerial vehicles and helicopters during target distribution. The mathematical apparatus used in the article is based on integer dynamic methods. The paper describes a step-by-step target allocation algorithm using the branch and bound method, which guarantees finding the global optimum for integer problems and also takes into account spatial-temporal constraints. The study proved that for mass strikes by inexpensive unmanned aerial vehicles, the algorithm automatically assigns unmanned aerial vehicles – interceptors and helicopters, preserving the resources of fighters and aviation strike assets for intercepting cruise missiles.*

**Keywords:** russian-ukrainian war; air defense; air attack means; air cover; unmanned aerial vehicles; UAV-interceptor; planning; target allocation; efficiency; combat operations.

## References

- [1.] O. Tytarenko and Ye. Vlasenko, "Air defense in the Russian-Ukrainian war: Lessons and recommendations," *Air Power of Ukraine*, vol. 1, no. 6, pp. 49–55, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-49-55>. (in Ukrainian)
- [2.] O. Holovchenko, "Trends in the conduct of armed struggle by the army of the Russian Federation - a study through the prism of content analysis," *Grail of Science*, no. 7, pp. 122–124, 2021, <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.27.08.2021.020>. (in Ukrainian)
- [3.] B. Zh. Shkurat, "Methodology of dynamic resource allocation in joint actions of ground and air defense assets," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 2(47), pp. 147–154, 2023, <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-147-154>. (in Ukrainian)
- [4.] I. I. Shovkoshtnyi and O. A. Vasylenko, "Target allocation management of a swarm of heterogeneous strike unmanned aerial vehicles for engaging non-stationary group targets based on an adaptive algorithm using optimization methods and artificial intelligence elements," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 3(54), pp. 15–24, 2025, <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-54-3-15-24>. (in Ukrainian)
- [5.] V. I. Hrabchak, V. M. Suprun, and Yu. S. Bystryk, "Mathematical model of optimal allocation of engagement means," *Military Technical Collection*, no. 1(10), pp. 16–23, 2014. (in Ukrainian)
- [6.] S. M. Teliukov, S. V. Huzchenko, I. A. Taran, and H. A. Zlyvka, "Methodology for determining the optimal allocation of anti-tank weapons for destroying enemy armored targets when planning fire ambushes in defensive combat," *Systems of Arms and Military Equipment*, no. 3(55), pp. 44–50, 2018. (in Ukrainian)
- [7.] H. A. Sheludko, V. V. Naumenko, and O. O. Strelnikova, *Methods for Solving Optimization Problems: Lecture Notes*. Kharkiv, Ukraine: UkrDAZT, 2014. (in Ukrainian)
- [8.] M. A. Hrynchenko and M. O. Chernyshova, "Technology of resource allocation in a project between performers," *Open Information and Computer Integrated Technologies*, no. 58, pp. 155–166, 2013. (in Ukrainian)
- [9.] V. D. Romanenko, *Game Theory: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. (in Ukrainian)
- [10.] P. V. Severilov and K. I. Hula, "Models of optimal resource allocation in a vertically integrated system," *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, no. 6, pp. 41–46, 2008. (in Ukrainian)
- [11.] O. Ye. Basmanov, D. I. Saveliev, R. S. Melezhyk, and T. O. Lutsenko, "Algorithm for optimal allocation of equipment among fire departments," *Problems of Emergencies*, no. 2(38), pp. 181–193, 2023. (in Ukrainian)
- [12.] NATO, *AJP-3.3: Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations*. Brussels, Belgium: NATO Standardization Office, 2016.
- [13.] Ya. B. Sikora, A. Y. Shchekhorskyi, and B. L. Yakymchuk, *Methods of Optimization and Operations Research*. Zhytomyr, Ukraine: Zhytomyr Ivan Franko State University Press, 2019. (in Ukrainian)
- [14.] H. P. Donets and L. M. Koliechkina, *Extremal Problems on Combinatorial Configurations: Monograph*. Poltava, Ukraine: PUET, 2011. (in Ukrainian)
- [15.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, *Temporary Staff Methodology for Evaluating the Effectiveness of Ukraine's Air Defense*, approved by Order of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine No. 232/dsk dated June 27, 2019. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2019. (in Ukrainian)

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-42-51

УДК.355.424.4

Гринько Євгеній Олександрович

<https://orcid.org/0009-0009-8864-5295>

Глоба Олександр Володимирович (доктор філософії)

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

Національний університет оборони України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 20.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 06.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЯ РЕАЛІЗАЦІЇ БОЙОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ УГРУПОВАННЯ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК ЗМІШАНОГО СКЛАДУ

У статті запропонований удосконалений підхід оцінювання бойових можливостей угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу щодо протидії засобам повітряного нападу противника під час прикриття важливих об'єктів. Необхідність дослідження та удосконалення існуючих підходів щодо визначення значень параметрів бойового порядку викликана потребою впорядкування наявних методик та формування універсального підходу до вироблення рекомендацій, які одночасно врахують вплив взаємного розташування бойових позицій та об'єкта прикриття на різні складові бойових можливостей угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу. Запропонований підхід використовує методика, яка одночасно враховує особливості форми та розміри об'єктів прикриття і дозволяє більш ґрунтовно оцінювати бойові можливості зенітних ракетних військ. Застосування такого підходу також дозволяє формувати рекомендації, практична реалізація яких підвищить ступінь реалізації бойових можливостей угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу під час прикриття важливих державних, військових об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури. За результатами проведених розрахунків надається приклад рекомендацій.

**Ключові слова:** угруповання зенітних ракетних військ, вогневі можливості, можливості з прикриття, система протиповітряної оборони, система зенітного ракетного прикриття.

### Вступ

З початком повномасштабного вторгнення Росії в Україну у 2022 році однією з ключових потреб Збройних Сил України стала ефективна система протиповітряної оборони (далі – ППО) і, зокрема, її важлива складова – система зенітного ракетного (ракетно-артилерійського) прикриття.

Збройні сили росії постійно підвищують спроможності своїх засобів повітряного нападу, удосконалюють форми та способи їх застосування, що, в свою чергу, веде до пошуку нових шляхів підвищення ефективності застосування зенітних ракетних військ [1-8].

Результати бойового застосування угруповань, військових частин і підрозділів зенітних ракетних військ (далі – ЗРВ) змішаного складу значною мірою залежить від форм та способів застосування противником сучасних засобів повітряного нападу (далі – ЗПН). В умовах російсько-українського збройного протистояння фіксується масоване використання високоточних балістичних та крилатих ракет, здатних завдяки складним траєкторіям польоту обходити звичайні системи ППО. Аналіз досвіду бойових дій зенітних ракетних частин і підрозділів протягом всього періоду війни свідчить про те, що домінуючим тактичним шаблоном противника є комбінація повітряної розвідки безпілотними літальними апаратами (далі – БпЛА) з подальшим завданням

концентрованих ударів крилатими, балістичними ракетами та ударними БпЛА по важливим державним об'єктам, об'єктам інфраструктури, місцям розміщення (пунктах постійної дислокації) військових угруповань (частинам та підрозділам) та пунктам управління різних рівнів [9].

Досвід застосування пілотованої та безпілотної авіації свідчить про те, що основною формою застосування ЗПН в сучасних умовах залишаються систематичні бойові дії з нанесенням зосереджених та групових ударів [5], [7], [8].

Таблиця 1

### Порівняння по тривалості ударів за часом з 2023 по 2025 роки.

Тип удару	Рік проведення	
	2023	2024-2025
Груповий	до 40 хв.	20-35 хв.
Зосереджений	40-70 хв.	50-70+ хв.
Інтенсивність	100-150 цілей/атаку	150-400+ цілей/атаку

Результати аналізу дій сучасних засобів повітряного нападу також показують, що якість прикриття важливих державних та військових об'єктів значною мірою залежить від можливості угруповань ЗРВ протидіяти новітнім типам загроз. Особливої актуальності набуває використання комплексного підходу до організації ППО, що включає інтеграцію спроможностей різних типів

зенітних ракетних комплексів (далі – ЗРК), вдосконалення тактичних прийомів і постійне підвищення рівня підготовки особового складу та злагодженості бойових обслуг [10], [11]. В залежності від мети та фази наступальної (повітряної наступальної) операції будуть залежати завдання, які буде вирішувати повітряний противник та відповідно визначені першочергові об'єкти для нанесення ударів.

Способи та засоби вогневого та радіоелектронного впливу на систему ППО визначаються різними типами (тактичними характеристиками) ЗПН, що залучаються до проведення ударних дій по угрупованням військ та об'єктам інфраструктури [12].

При цьому, можливості угруповань, військових частин і підрозділів ЗРВ протидіяти повітряному противнику визначаються переважно їх вогневими можливостями та можливостями з прикриття. Звідси маємо, що підвищення ступеня їх реалізації призводить до підвищення якісних показників результатів бойових дій і, відповідно, ступеню виконання бойових завдань ЗРВ.

Тому, метою статті стало розкриття основних положень удосконаленого підходу до оцінювання бойових можливостей ЗРВ та надання практичних рекомендацій щодо підвищення ступеня їх реалізації.

### Матеріали та методи

Вибір показників та критеріїв оцінювання ступеня реалізації бойових можливостей угруповання ЗРВ змішаного складу є важливим і складним етапом удосконалення методики. Вони визначаються змістом бойових завдань, які виконує угруповання або військова частина ЗРВ, її можливостями, характеристиками об'єктів прикриття, можливостями ЗПН щодо нанесення ураження [10], [11].

За результатами аналізу досвіду російсько-української війни, тактики застосування основних типів ЗПН, можна стверджувати, що сьогодні повітряний противник діє у всьому діапазоні висот і швидкостей, використовує різноманітні засоби радіоелектронної боротьби, з високою щільністю наносить різні комбіновані удари, здійснює відволікаючі і маневрені дії, застосовує пастки. Враховуючи таку тактику дій, тактико-технічні характеристики ЗПН, наявне в ЗРВ озброєння [11], та відомі підходи до побудови бойових порядків [13-15], необхідно створити таку систему зенітного ракетного прикриття, яка забезпечить прикриття важливих державних, військових та об'єктів критичної інфраструктури в широкому діапазоні висот та швидкостей із врахуванням необхідності забезпечення взаємного вогневого прикриття.

Розглянемо порядок функціонування методики обґрунтування визначення віддалення бойових позицій угруповання ЗРВ від меж об'єктів прикриття, блок-схема якої зображена на рис. 1.

Блок 1. Формування вихідних даних.

В блоці формуються вихідні дані щодо: повітряного противника, складу угруповання ЗРВ, тактико-технічних характеристик (далі – ТТХ)

зенітних ракетних комплексів (далі – ЗРК), характеристик об'єкта прикриття (угруповання військ). Далі на основі вихідних даних проводиться: оцінювання повітряного противника, об'єктів прикриття (угруповання військ), РВЗ противника.

Оцінювання об'єкта прикриття (угруповання військ) включає: вивчення характеру, розмірів об'єкта (військ, що прикриваються), важливості його елементів і розташування відносно інших об'єктів. Межі об'єкта, що прикриваються, визначаються вищим командиром (командувачем).

За результатами оцінювання об'єкта прикриття (угруповання військ) визначається: засоби ураження, які може застосувати повітряний противник; напрямки зосередження основних зусиль; найбільш імовірні способи його дій.

Після аналізу отриманих вихідних даних щодо: повітряного противника, складу військової частини ЗРВ, ТТХ ЗРК, характеристик об'єкта прикриття (угруповання військ) проводиться їх формалізація.

Блок 2. Розрахунок віддалень бойових позицій зрди від меж об'єкта прикриття. У блоці починається цикл розрахунків часткових показників для угруповання ЗРВ визначеного складу.

Для створення системи зенітного ракетного прикриття важливих державних, військових об'єктів та об'єктів критичної інфраструктури необхідно провести розрахунок віддалень бойових позицій вогневих підрозділів від меж об'єкта прикриття. Для цього можна використати узагальнений показник, який відображає ступінь реалізації бойових можливостей і формується шляхом мультиплікативного перетворення сукупності часткових показників:

$$k_{ij} = k'_{ij} \cdot k''_{ij} \cdot k'''_{ij}, \quad (1)$$

де  $k'_{ij}$  – ступень реалізації можливостей з прикриття;

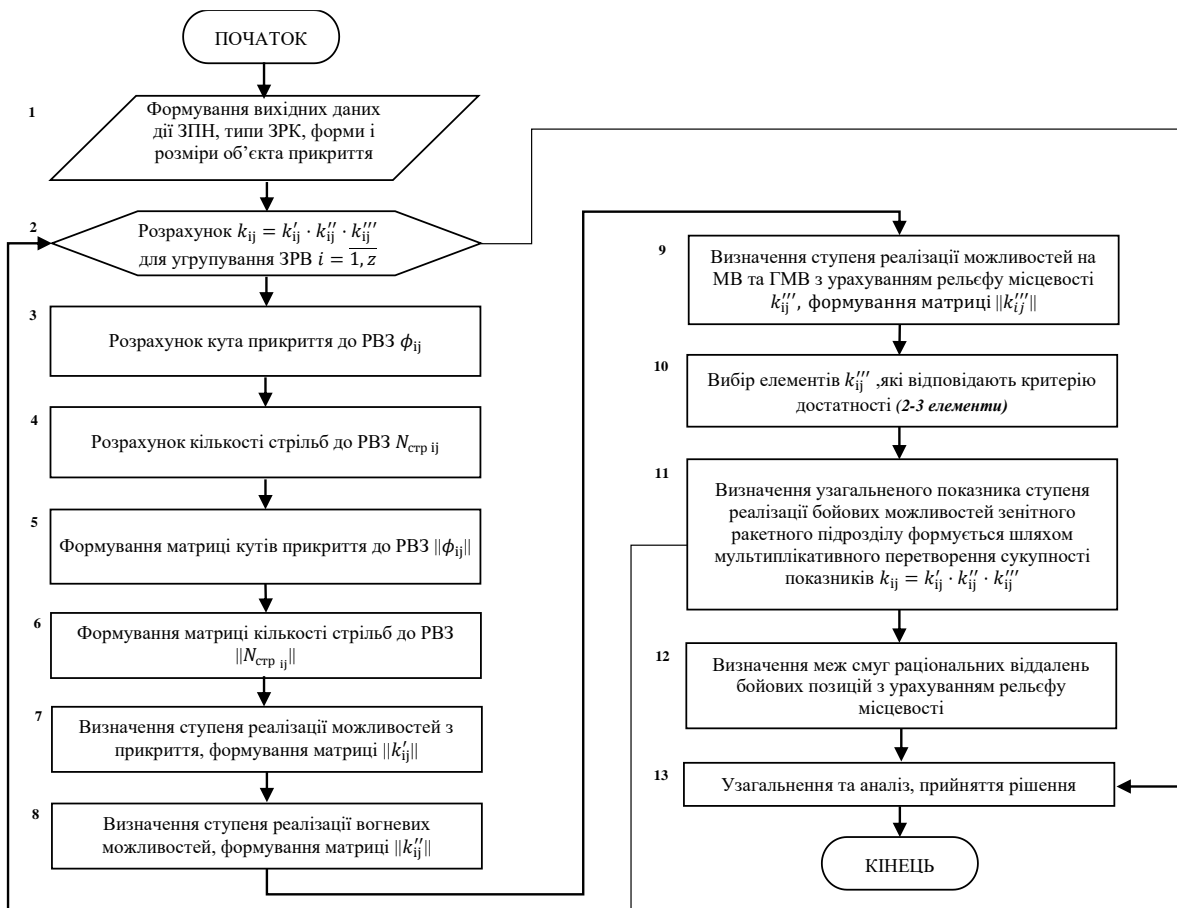
$k''_{ij}$  – ступень реалізації вогневих можливостей;

$k'''_{ij}$  – коефіцієнт реалізації зони ураження за напрямком на МВ та ГМВ.

Блок 3. Розрахунок значень кутів прикриття до рубежу виконання завдань (далі – РВЗ) повітряним противником на різних висотах  $\phi_{ij}$ , формування матриці, де  $\phi_{ij}$  – половина величини кута прикриття об'єкта до РВЗ повітряним противником для  $i$ -го підрозділу при  $j$ -му значенні  $R_{спj}$ ;  $\phi_{imax}$  – половина величини максимального кута прикриття об'єкта до РВЗ повітряним противником на  $i$ -й висоті при  $j$ -му значенні  $R_{спj}$ .

Для кожного значення  $H_i$  та фіксованих значень  $R_{спj}$  визначається величина кута прикриття до РВЗ повітряним противником на різних висотах  $\phi_{ij}$ .

Блок 4. Розрахунок кількості стрільб до РВЗ повітряним противником  $N_{стр ij}$ , формування матриці.



Рисуюнок 1 – Блок-схема удосконаленої методики обґрунтування визначення віддалення бойових позицій угруповання ЗРВ від меж об'єктів прикриття.

Кількість стрільб до РВЗ повітряним противником на різних висотах  $N_{стр ij}$  залежить від висоти ( $H_i$ ), типу ЗРК, РВЗ повітряним противником ( $R_{РВЗ}$ ) та віддалення бойової позиції зенітного ракетного підрозділу від об'єкта прикриття ( $R_{спj}$ ) і розраховується за формулою:

Для кожного значення висоти  $H_i$  та фіксованих значень  $R_{спj}$  визначається глибина виносу дальньої межі зони ураження  $d_{дi}$  за РВЗ (об'єкт прикриття) повітряним противником ( $\Delta h_{ij}$ ) на прогнозованому напрямку удару повітряного противника та розраховується за формулою:

$$N_{стр ij} = K \cdot \left( \frac{\Delta h_{ij}}{V_{цi}} + 1 \right), \quad (2)$$

де  $K$  – кількість цільових каналів ЗРК;  
 $V_{цi}$  – розрахункова швидкість цілі на  $i$ -й висоті;  
 $\Delta h_{ij} = \Delta h_{ij} = (\delta_{спj} + d_{дi})$  глибина виносу дальньої межі зони ураження за РВЗ (об'єкт прикриття) повітряним противником.

Складається матриця кількості стрільб  $N_{стр ij}$ .

Блок 5. Складання матриці з визначеним кроком від об'єкта відмічаються фіксовані віддалення

позицій ЗРК  $R_{спj}$ . Визначають кути  $\phi_{ij}$  і їх значення заносять в відповідні графи матриці  $\phi_{ij}$ . Складається матриця кутів прикриття.

Блок 6. Формування матриці кількості стрільб  $N_{стр ij}$  до РВЗ.

Для цього послідовно в кожному рядку матриці  $N_{стр ij}$  у всьому діапазоні зміни  $R_{спj}$ ,  $j = \overline{1, n}$  визначають максимальне значення кількості стрільб за умовою  $N_{стр i \max} = \max_j N_{стр ij}$  кожне фіксоване значення  $N_{стр ij}$  на даній  $i$ -й висоті нормують та записують у відповідні графи матриці  $k'_{ij}$ .

Блок 7. Визначення ступеню реалізації можливостей з прикриття, формування матриці.

$$k'_{ij} = \left( \frac{\phi_{ij}}{\phi_{i \max}} \right). \quad (3)$$

Блок 8. Визначення ступеню реалізації вогневих можливостей, формування матриці.

$$k''_{ij} = \left( \frac{N_{стр ij}}{N_{стр i \max}} \right), \quad (4)$$

де  $N_{стр ij}$  – кількість стрільб зенітного ракетного підрозділу до РВЗ (об'єкту прикриття) повітряним

противником для  $i$ -го підрозділу при  $j$ -му значенні  $R_{спj}; N_{стрi \max}$  – максимальна кількість стрільб зенітного ракетного підрозділу до РВЗ (об'єкту прикриття) повітряним противником для  $i$ -го підрозділу при  $j$ -му значенні  $R_{спj}$ .

Блок 9. Визначення ступеня реалізації бойових можливостей на МВ та ГМВ з урахуванням рельєфу місцевості.

Однак, проведений аналіз застосування ЗПН свідчить про збільшення їх частки, які діятимуть на МВ та ГМВ. Це, в свою чергу потребує створення ефективної системи вогню на МВ та ГМВ. Отже, необхідно розв'язати задачу з визначення такого  $R_{спj}$ , яке відповідає вимогам максимального значення показника ступеня реалізації можливостей на МВ та ГМВ з урахуванням рельєфу місцевості.

Розв'язання цієї задачі можливе, якщо урахувати новий показник – коефіцієнт реалізації зони ураження за напрямком на МВ та ГМВ  $k_{ij}'''$ . Урахування нового показника дає змогу оцінити вплив рельєфу місцевості на ступінь реалізації бойових можливостей, а на основі проведеного оцінювання приймати рішення щодо розміщення бойової позиції зенітного ракетного підрозділу на визначеному віддаленні від об'єкта прикриття.

Коефіцієнт реалізації зони ураження за напрямком на МВ та ГМВ з урахуванням рельєфу місцевості зенітного ракетного підрозділу розраховують за допомогою ГІС "Аргумент-2024" або графоаналітичним методом.

Для цього порівнюють за напрямками  $\beta_i$  глибини граничної та реалізованої зон вогню, що побудовані відносно умовного центра об'єкта з урахуванням рельєфу місцевості.

Напрямок  $\beta_i$  береться з дискретністю 60 градусів. Загальний коефіцієнт ступеня реалізації зони вогню з урахуванням рельєфу місцевості розраховується за формулою:

$$K_{рзв} = \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n K_{рзо}(\beta_i) \right), \quad (5)$$

де  $n$  – кількість напрямків.

ступінь прикриття об'єкту зоною вогню до рубежу виконання завдання противником:

$$K_{пр} = 1 - \frac{\phi_{\Sigma}}{360^{\circ}}, \quad (6)$$

де  $\phi_{\Sigma} = \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_n$  (град.);  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$  – величини секторів, в яких не забезпечується прикритті об'єктів до РВЗ (град.) (об'єкту прикриття).

Блок 10. Вибір елементів, які будуть найбільші за своїм значенням (які відповідають критерію достатності).

З матриці обирають 2-3 елементи, які будуть

найбільші за своїм значенням.

Блок 11. Визначення узагальненого показника ступеня реалізації бойових можливостей підрозділу ЗРВ:

$$k_{ij} = k'_{ij} \cdot k''_{ij} \cdot k'''_{ij}.$$

З матриці  $k_{ij}$  визначаються  $R_{сп,рац}$  при яких узагальнені показники ступеня реалізації бойових можливостей досягають максимального значення.

Блок 12. Визначення смуг раціональних віддалень бойових позицій з урахуванням рельєфу місцевості.

З цією метою проводиться пошук  $R_{спj}$ , у межах зміни ступеня реалізації бойових можливостей  $k_{i \max}$ , методом послідовних поступок.

Визначається величина допустимого відхилення значення показника ступеня реалізації бойових можливостей на  $\Delta_n$ , відносно максимального значення  $k_{i \max}$ . Потім здійснюється пошук максимального значення ступеня реалізації можливостей щодо створення системи вогню на МВ та ГМВ з урахуванням рельєфу місцевості в межах допустимого відхилення по першому показнику. Межі допустимого відхилення значення показника ступеня реалізації бойових можливостей  $k_{i \max}$  визначають смугу раціональних віддалень бойових позицій від об'єкта прикриття.

Блок 13. Проводиться аналіз та здійснюється оцінювання кількості та типів ЗРК для яких проведені розрахунки та приймається рішення щодо продовження розрахунків в циклі чи здійснюється завершення.

## Результати

Основними особливостями методики, що пропонується є:

універсальний підхід до розрахунків, який враховує розміри, особливості об'єкту прикриття (всі об'єкти за формою, розміром, масштабом, географічним розташуванням різні, удосконалена методика визначення віддалення бойових позицій угруповання зенітних ракетних військ від меж об'єктів прикриття підходить до розрахунку будь яких об'єктів прикриття);

врахування впливу виконання завдань повітряним противником на малих і гранично малих висотах на ефективність ведення бойових дій угрупованням ЗРВ;

можливість обґрунтування переваг і недоліків будь якого значення напряму і виносу бойової позиції підрозділу угруповання ЗРВ змішаного складу від меж об'єктів прикриття.

Щоб оцінити ефективність методики та порівняти її з існуючою, обчислено узагальнені показники ступеня реалізації для  $K_{узг} - ЗРК \text{ №}1$  (табл. 2, рис. 2),  $K_{узг} - ЗРК \text{ №}2$  (табл. 3, рис. 3),  $K_{узг} - ЗРК \text{ №}3$  (табл. 4, рис. 4).

Аналіз проведення розрахунків показав, що при надмірному наближенні бойових позицій до меж об'єкта прикриття зменшується глибина зони ураження за межами об'єкта, що призводить до скорочення часу перебування цілей у зоні вогню та зниження кількості можливих стрільб по них.

Таблиця 2

Узагальнений показник реалізації бойових можливостей для ЗРК №1

Узагальнений коефіцієнт ЗРК №1					
I напрямок	II напрямок	III напрямок	IV напрямок	V напрямок	VI напрямок
0,030185	0,107432	0,222812	0,207046	0,056592	0,240688
0,058105	0,086433	0,181874	0,177606	0,201600	0,186285
0,051892	0,114393	0,155923	0,152091	0,075278	0,139652
0,042577	0,109602	0,132162	0,091825	0,165967	0,025869
0,032219	0,163943	0,145762	0,111631	0,171174	0,121973
0,045627	0,110606	0,135513	0,109864	0,160090	0,065414
0,112057	0,124452	0,041978	0,082860	0,154661	0,045993
0,072062	0,101515	0,045299	0,087218	0,083146	0,087519
0,054802	0,058879	0,030489	0,083278	0,046231	0,085412
0,022957	0,039902	0,023144	0,081612	0,041499	0,050272
0,017584	0,062904	0,022529	0,066407	0,033729	0,051043
0,025618	0,022222	0,017764	0,029074	0,030422	0,027552
0,004778	0,012963	0,023148	0,019444	0,018537	0,022000
0,002963	0,010889	0,013889	0,013889	0,009917	0,006481
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

ЗРК №1

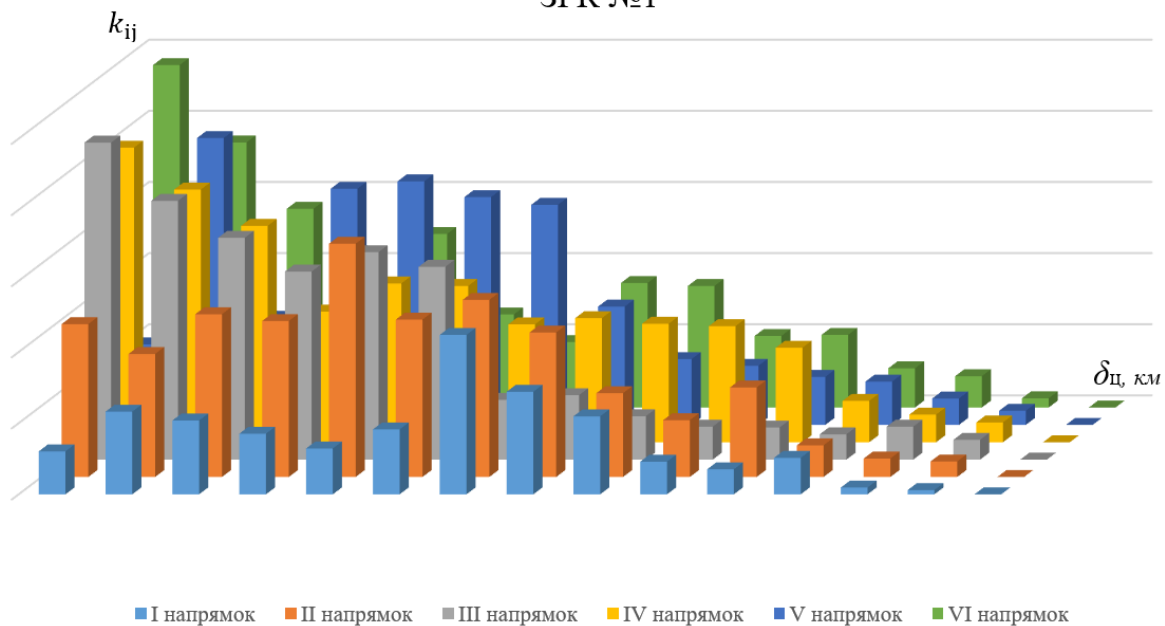


Рисунок 2 – Узагальнений показник реалізації бойових можливостей для ЗРК №1

Таблиця 3

Узагальнений показник реалізації бойових можливостей для ЗРК №2

Узагальнений коефіцієнт ЗРК №2					
I напрямок	II напрямок	III напрямок	IV напрямок	V напрямок	VI напрямок
0,031493	0,091312	0,151559	0,108345	0,077922	0,097986
0,048983	0,063834	0,126691	0,105197	0,115119	0,081810
0,039781	0,057158	0,105017	0,067363	0,072669	0,070102

Узагальнений коефіцієнт ЗРК №2					
I напрямок	II напрямок	III напрямок	IV напрямок	V напрямок	VI напрямок
0,027120	0,041815	0,045492	0,041135	0,060148	0,013122
0,018628	0,016245	0,054507	0,039060	0,054334	0,018434
0,007343	0,007750	0,013810	0,011204	0,014352	0,006264
0,004929	0,006722	0,006678	0,008628	0,009740	0,004366
0,003769	0,001171	0,006101	0,000000	0,006881	0,001157
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

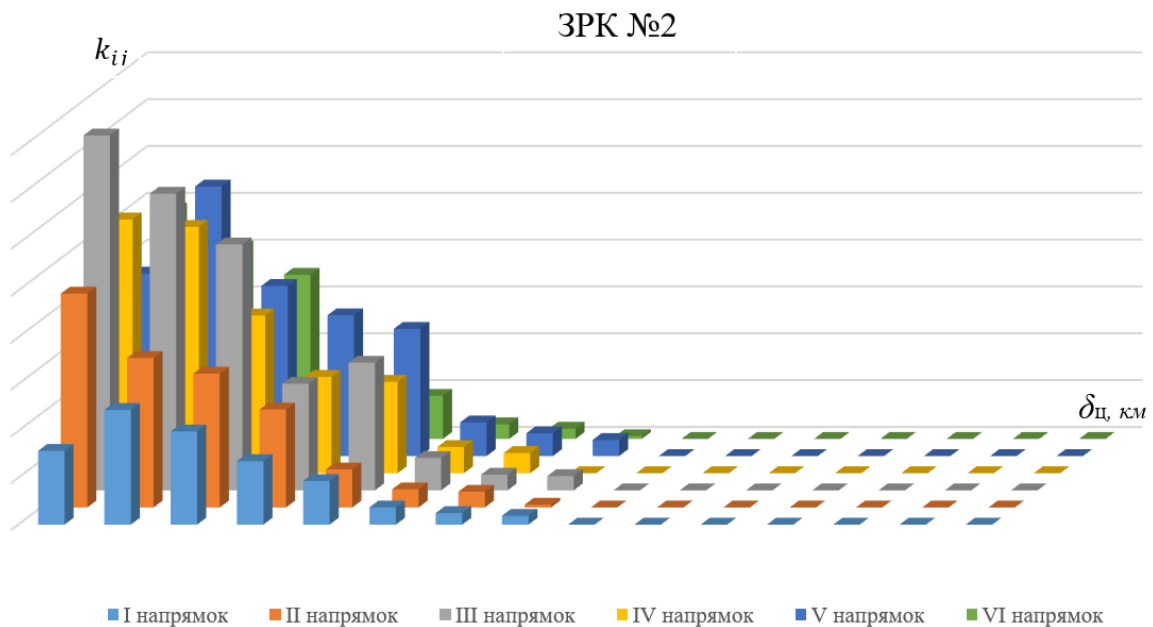


Рисунок 3 – Узагальнений показник реалізації бойових можливостей для ЗРК №2

Таблиця 4

Узагальнений показник реалізації бойових можливостей для ЗРК №3

Узагальнений коефіцієнт ЗРК №3					
I напрямок	II напрямок	III напрямок	IV напрямок	V напрямок	VI напрямок
0,249287	0,610000	0,726222	0,723009	0,263796	0,674074
0,355833	0,477963	0,547185	0,592444	0,572704	0,521824
0,308889	0,443463	0,454963	0,490389	0,506426	0,445926
0,246944	0,404852	0,395259	0,367074	0,473148	0,166481
0,187250	0,395370	0,338074	0,365556	0,421296	0,350000
0,193694	0,330296	0,296296	0,330500	0,375926	0,309778
0,289046	0,331259	0,175056	0,289009	0,343519	0,264407
0,231519	0,293037	0,196389	0,272917	0,297176	0,259259
0,191509	0,270519	0,153407	0,256426	0,172926	0,239815

Узагальнений коефіцієнт ЗРК №3					
I напрямок	II напрямок	III напрямок	IV напрямок	V напрямок	VI напрямок
0,127361	0,187426	0,113102	0,241944	0,153222	0,208380
0,105167	0,250000	0,106722	0,232620	0,165259	0,213889
0,191444	0,186509	0,104898	0,213657	0,197324	0,194444
0,060648	0,164815	0,154398	0,175972	0,134630	0,156667
0,049111	0,140407	0,131667	0,151315	0,089000	0,113907
0,040556	0,095278	0,092593	0,100157	0,114815	0,092593

## ЗРК №3

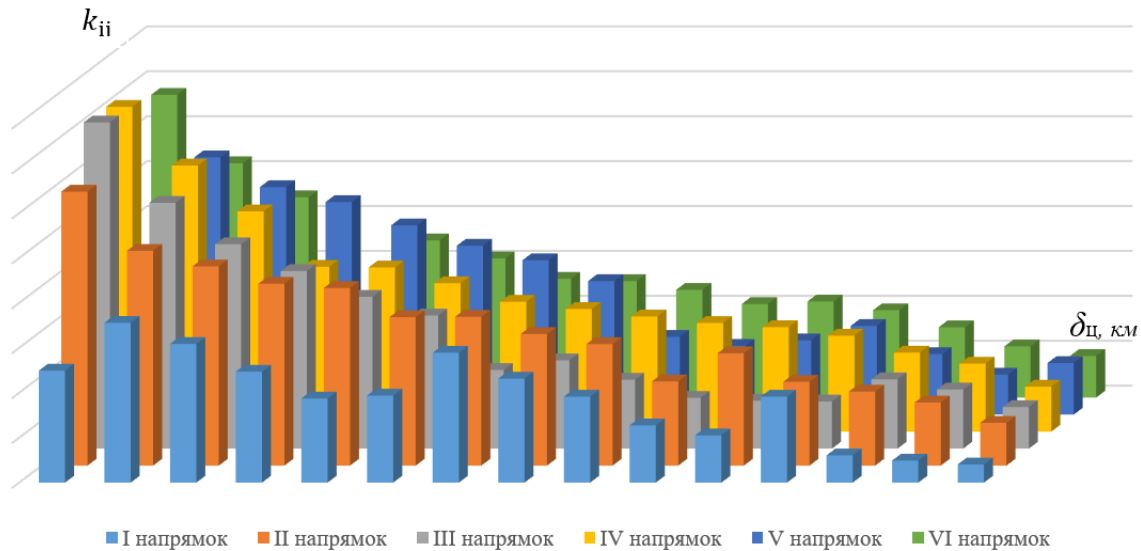


Рисунок 4 – Узагальнений показник реалізації бойових можливостей для ЗРК №3

Разом з тим, результати розрахунків підтвердили, що надмірне збільшення віддалення бойових позицій також негативно впливає на значення узагальненого коефіцієнта. Це пояснюється збільшенням інтервалів між зонами ураження та зниженням щільності зенітного ракетного вогню безпосередньо над об'єктом прикриття.

## Обговорення

Результати розрахунків, виконаних за удосконаленою методикою визначення віддалення бойових позицій зенітних ракетних підрозділів від меж об'єктів прикриття, показують, що ефективність системи зенітного ракетного вогню значною мірою залежить від раціонального розміщення позицій зенітних ракетних підрозділів відносно об'єкта прикриття та забезпечення взаємного перекриття зон ураження.

На основі прийнятої вихідної обстановки, результатів проведених розрахунків та аналізу сучасного досвіду бойового застосування сил і засобів протиповітряної оборони сформульовано рекомендації щодо удосконалення побудови бойового порядку угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу під час прикриття важливих державних об'єктів.

Під час організації прикриття важливих об'єктів доцільно створювати ешелоновану систему

зенітного ракетного вогню, яка забезпечує ураження ЗПН противника у всьому діапазоні висот польоту та на всіх напрямках їх можливого застосування.

Крім того, під час побудови бойового порядку необхідно враховувати ракетні небезпечні напрямки, на яких противник з найбільшою ймовірністю може застосувати крилаті ракети, БпЛА або інші засоби повітряного нападу. На таких напрямках доцільно зосереджувати основні сили і засоби зенітних ракетних військ та створювати підвищену щільність зенітного ракетного вогню.

Досвід бойових дій свідчить, що противник активно застосовує засоби повітряного нападу, які здійснюють політ на малих і гранично малих висотах з використанням складного рельєфу місцевості. До таких засобів належать крилаті ракети, БпЛА, а також окремі типи авіаційних засобів ураження.

У таких умовах ефективність застосування зенітних ракетних комплексів значною мірою залежить від правильного вибору районів розташування бойових позицій та забезпечення максимальної реалізації зон ураження на найбільш імовірних напрямках дій повітряного противника.

Удосконалена методика визначення віддалення бойових позицій зенітних ракетних підрозділів передбачає врахування впливу рельєфу місцевості

шляхом використання коефіцієнта реалізації зони ураження за напрямками.

Зазначений коефіцієнт дозволяє оцінити ступінь реалізації зони ураження зенітного ракетного комплексу в конкретних умовах місцевості та визначити найбільш вигідні райони розташування бойових позицій.

Результати проведених розрахунків показують, що правильний вибір позицій дозволяє суттєво підвищити ефективність застосування зенітних ракетних підрозділів.

Рекомендації щодо застосування удосконаленої методики в органах військового управління.

Удосконалена методика визначення віддалення бойових позицій зенітних ракетних підрозділів від меж об'єктів прикриття може ефективно застосовуватися органами військового управління під час планування бойового застосування угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу для прикриття важливих державних об'єктів та угруповань військ.

Застосування методики дозволяє обґрунтовано визначити раціональні райони розташування бойових позицій зенітних ракетних підрозділів, забезпечувати максимальну реалізацію бойових можливостей зенітних ракетних комплексів та підвищувати ефективність системи зенітного ракетного вогню.

Практичне застосування методики доцільно здійснювати під час:

планування системи протиповітряної оборони об'єктів;

визначення бойового порядку угруповання зенітних ракетних військ;

уточнення районів розташування позицій зенітних ракетних підрозділів;

оцінювання ефективності системи зенітного ракетного вогню.

Слід також зазначити, що сьогодні у відомих доктринальних публікаціях з протиповітряної та протиракетної оборони НАТО та Сполучених Штатів Америки [16] - [19] відсутні будь які конкретні рекомендації щодо визначення раціональних віддалень бойових позицій ЗРК від об'єктів прикриття та щодо побудови системи зенітного ракетного вогню угрупованнями ЗРВ змішаного складу. В цих документах лише перелічуються загальні принципи, правила та настанови щодо застосування угруповань, військових частин і підрозділів ППО. Тому, питання вибору та порівняння сучасних підходів щодо організації систем зенітного ракетного прикриття, протиповітряної та протиракетної оборони залишається відкритим.

### Висновки

На основі аналізу сучасного характеру застосування засобів повітряного нападу встановлено, що ефективність системи зенітного ракетного прикриття визначається не лише тактико-технічними характеристиками зенітних ракетних комплексів, а насамперед раціональністю побудови бойового порядку та ступенем реалізації їх вогневих можливостей.

Запропонована удосконалена методика визначення віддалення бойових позицій забезпечує комплексне врахування впливу геометричних параметрів об'єкта прикриття, напрямків дій повітряного противника, висотно-швидкісних характеристик ЗПН, а також рельєфу місцевості на ефективність застосування ЗРВ.

На відміну від існуючих підходів, методика дозволяє:

обґрунтовано визначити раціональні віддалення бойових позицій;

оцінювати ступінь реалізації бойових можливостей за сукупністю показників;

забезпечувати максимальне перекриття зон ураження на найбільш небезпечних напрямках;

враховувати вплив МВ та ГМВ дій повітряного противника.

Отримані результати підтверджують, що раціональний вибір віддалень бойових позицій та побудова ешелонованої системи вогню дозволяють суттєво підвищити ефективність функціонування системи зенітного ракетного прикриття та зменшити ймовірність досягнення противником РВЗ (меж об'єктів прикриття).

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання органами військового управління, військовими частинами та підрозділами під час планування бойового застосування ЗРВ, визначення бойових порядків та оцінювання ефективності системи протиповітряної оборони.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє підвищити обґрунтованість прийняття рішень, забезпечити більш повну реалізацію бойових можливостей угруповань ЗРВ щодо прикриття важливих об'єктів в сучасних умовах ведення війни.

### Список використаних джерел

- [1.] В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (червень 2022 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2022.
- [2.] В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (лютий 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [3.] В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (березень 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [4.] В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (червень 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [5.] В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (липень 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [6.] В. Ф. Залужний, М. Забродський, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (серпень 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [7.] О. Сирський, А. Баргилевич, О. Шевченко та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни

- (січень 2024 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2024.
- [8.] В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (лютий–березень 2022 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2022.
- [9.] М. А. Левченко та ін., Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України у російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 – липень 2023): навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2024.
- [10.] С. П. Ярош, А. О. Бережний, В. Г. Малюга та Д. О. Меленті, Оцінювання ефективності бойових дій підрозділів родів військ Повітряних Сил: навч. посіб. Харків, Україна: ХНУПС, 2024.
- [11.] Б. Ж. Шкурят та ін., Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння: навч. посіб., А. Г. Салій, Ред. Київ, Україна: НУОУ, 2025.
- [12.] О. В. Глоба та М. А. Левченко, "Уточнення понятійного апарату для проведення досліджень ефективності і спроможностей системи зенітного ракетного прикриття," Повітряна міць України, т. 1, № 2(3), с. 17–23, 2022, [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).
- [13.] С. П. Ярош, "Обґрунтування раціонального варіанту бойового порядку зенітних ракетних підрозділів при відбитті удару крилатих ракет," Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, № 2(15), с. 79–85, 2014.
- [14.] А. Я. Торопчин, І. О. Романенко, Ю. Г. Даник та ін., Довідник з протиповітряної оборони. Київ, Харків, Україна: МО України, ХВУ, 2003.
- [15.] А. Я. Торопчин, І. О. Кириченко, М. О. Єрмошин, Г. А. Дробаха та М. П. Долина, Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка її ефективності: монографія. Харків, Україна: ХУПС, 2006.
- [16.] NATO Standardization Agency, ATP-82: Allied Doctrine for Ground-Based Air Defense. Brussels, Belgium: NSA, 2018.
- [17.] U.S. Air Force, AFDP 3-01: Air Force Doctrine Publication. Counterair Operations. Washington, DC, USA: USAF, 2023.
- [18.] Headquarters Department of the Army, FM 3-01: U.S. Army Air and Missile Defense Operations. Washington, DC, USA: HQDA, 2025.
- [19.] Headquarters Department of the Army, FM 3-01.44: Short-Range Air Defense Operations. Washington, DC, USA: HQDA, 2022.

**Yevhenii Hrynko**

<https://orcid.org/0009-0009-8864-5295>

**Oleksandr Hloba (PhD)**

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

*National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## RECOMMENDATIONS FOR ENHANCING THE REALIZATION OF COMBAT CAPABILITIES OF MIXED SURFACE-TO-AIR MISSILE GROUP OF TROOPS

*The article proposes an advanced approach to assessing the combat capabilities of mixed surface-to-air missile groups in countering enemy air attack assets during the protection of critical facilities. The need to refine existing approaches to determining battle formation parameters arises from the necessity to systematize current methodologies and to establish a universal framework for generating recommendations. This framework simultaneously accounts for the influence of the relative positioning of battle positions and the defended facility on various components of the combat effectiveness of mixed surface-to-air missile groups. The proposed methodology incorporates the specific shape and dimensions of the defended facilities, enabling a more comprehensive evaluation of the capabilities of the Surface-to-Air Missile Troops. Implementation of this approach facilitates the development of recommendations whose practical application enhances the effectiveness of mixed surface-to-air missile groups in protecting vital state, military, and critical infrastructure facilities. An example of such recommendations, based on the conducted calculations, is provided.*

**Keywords:** mixed surface-to-air missile group of troops, fire capabilities, coverage capabilities, air defense system, surface-to-air missile coverage system.

### References

- [1.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (June 2022): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2022. (in Ukrainian)
- [2.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (February 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [3.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (March 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [4.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (June 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [5.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (July 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)

- [6.] V. F. Zaluzhnyi, M. Zabrodskiy, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (August 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [7.] O. Syrskiy, A. Barhylevych, O. Shevchenko, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (January 2024): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [8.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (February–March 2022): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2022. (in Ukrainian)
- [9.] M. A. Levchenko et al., Employment of Air Defense Forces and Means of Ukraine in the Russo-Ukrainian War: Experience, Lessons, Recommendations (February 2022 – July 2023): Study Guide. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [10.] S. P. Yarosh, A. O. Berezhnyi, V. H. Maliuha, and D. O. Melenti, Evaluation of the Combat Effectiveness of Air Force Branches Units: Study Guide. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National Air Force University, 2024. (in Ukrainian)
- [11.] B. Zh. Shkurat et al., Air and Missile Defense Means of the Defense Forces of Ukraine. Foreign Armament: Study Guide, A. H. Salii, Ed. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2025. (in Ukrainian)
- [12.] O. V. Hloba and M. A. Levchenko, "Clarification of the conceptual apparatus for conducting research on the effectiveness and capabilities of the anti-aircraft missile cover system," *Air Power of Ukraine*, vol. 1, no. 2(3), pp. 17–23, 2022, [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). (in Ukrainian)
- [13.] S. P. Yarosh, "Justification of the rational variant of the battle formation of anti-aircraft missile units when repelling a cruise missile strike," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, no. 2(15), pp. 79–85, 2014. (in Ukrainian)
- [14.] A. Ya. Toropchyn, I. O. Romanenko, Yu. H. Danyk, et al., *Air Defense Handbook*. Kyiv, Kharkiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, Kharkiv Military University, 2003. (in Ukrainian)
- [15.] A. Ya. Toropchyn, I. O. Kyrychenko, M. O. Yermoshyn, H. A. Drobakha, and M. P. Dolyna, *Synthesis of Adaptive Structures of the Anti-Aircraft Missile and Artillery Cover System for Objects and Troops and Assessment of Its Effectiveness: Monograph*. Kharkiv, Ukraine: Kharkiv National Air Force University, 2006. (in Ukrainian)
- [16.] NATO Standardization Agency, ATP-82: *Allied Doctrine for Ground-Based Air Defense*. Brussels, Belgium: NSA, 2018.
- [17.] U.S. Air Force, AFDP 3-01: *Air Force Doctrine Publication. Counterair Operations*. Washington, DC, USA: USAF, 2023.
- [18.] Headquarters Department of the Army, FM 3-01: *U.S. Army Air and Missile Defense Operations*. Washington, DC, USA: HQDA, 2025.
- [19.] Headquarters Department of the Army, FM 3-01.44: *Short-Range Air Defense Operations*. Washington, DC, USA: HQDA, 2022.

## БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОДІВ ВІЙСЬК (СИЛ) ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-52-62

УДК 355.424.4 (477)

<sup>1</sup>Кривоножко Анатолій Миколайович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-1470-7301>

<sup>2</sup>Резнік Дмитро Вікторович (кандидат військових наук, доцент)

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

<sup>2</sup>Паталаха Валерій Григорович (кандидат військових наук, доцент)

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

<sup>2</sup>Горобець Юрій Олексійович (кандидат військових наук, доцент)

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

<sup>1</sup>Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 01.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

### ЕВОЛЮЦІЯ ТАКТИКИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК ЯК ФАКТОР ТРАНСФОРМАЦІЇ СИСТЕМИ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ТА ПРОТИРАКЕТНОЇ ОБОРОНИ УКРАЇНИ У ВІЙНИ ЗА НЕЗАЛЕЖНІСТЬ

У статті досліджено еволюцію тактики застосування зенітних ракетних військ як одного з ключових факторів трансформації системи протиповітряної та протиракетної оборони під час Війни за Незалежність України.

Визначено основні фактори, що впливають на форми і способи бойового застосування зенітних ракетних військ, серед яких підвищення маневреності та живучості військових частин та підрозділів зенітних ракетних військ, інтеграція різнорідних засобів ураження та розвідки в єдину систему зенітного ракетного прикриття, розвиток багатошарової структури оборони, удосконалення взаємодії між зенітними ракетними військами, винищувальною та армійською авіацією, силами безпосереднього протиповітряного прикриття, а також забезпечення стійкості системи управління в умовах активного вогневого, радіоелектронного та інформаційного впливу противника.

За результатами аналізу факторів, тенденцій змін у формах і способах бойового застосування військових частин та підрозділів зенітних ракетних військ та з урахуванням зростання ролі безпілотних літальних апаратів, високоточної зброї, балістичних і крилатих ракет в комбінованих повітряних ударах противника визначено чотири основні етапи еволюції тактики застосування зенітних ракетних військ під час Війни за Незалежність України, які системно показують трансформацію системи протиповітряної та протиракетної оборони України у напрямку формування адаптивної, багатошарової та мережецентричної архітектури.

Встановлено зростання ролі спільних дій зенітних ракетних військ з винищувальною авіацією, мобільними вогневими групами та підрозділами зенітних безпілотних літальних апаратів-перехоплювачів в сучасній системі ППО-ПРО.

Стаття може бути корисною для фахівців зенітних ракетних військ, органів військового управління, а також науковців, які досліджують проблеми розвитку системи протиповітряної та протиракетної оборони.

**Ключові слова:** зенітні ракетні війська, тактика застосування зенітних ракетних військ, форма і спосіб бойового застосування, зенітне ракетне прикриття, інтегрована система ППО-ПРО, протиповітряна оборона, протиракетна оборона.

#### Вступ

Сучасний характер збройної боротьби визначається високою динамічністю, широким застосуванням високоточної зброї, безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в комбінованих ударах засобів повітряного нападу (ЗПН). За таких умов критичного значення набуває ефективне функціонування системи протиповітряної та протиракетної оборони (ППО-ПРО), ключовим елементом якої є система зенітного ракетного прикриття (ЗРП), а зенітні ракетні війська (ЗРВ)

виступають її основною вогневою силою.

Досвід війни за незалежність України засвідчив, що характер повітряних загроз зазнав суттєвої еволюції – від переважання одиночних та групових ударів до масованих, комбінованих ракетно-авіаційних атак із широким застосуванням крилатих ракет, балістичних ракет та малорозмірних БпЛА [1–9].

На різних етапах війни за незалежність України простежується закономірна еволюція тактики застосування ЗРВ – від класичної зональної

системи до маневреної, багатощарової та мережецентричної системи ЗРП. Кожен із цих етапів супроводжувався зміною принципів організації бойового застосування ЗРВ, ступеня інтеграції сил і засобів, рівня автоматизації управління та способів взаємодії між різнорідними компонентами системи ППО-ПРО, включно з винищувальною авіацією, мобільними вогневими групами (МВГ) та зенітними БпЛА-перехоплювачами.

Висока інтенсивність і комбінований характер ударів обумовили необхідність швидкої адаптації системи ППО-ПРО України до нових умов ведення бойових дій. Ключову роль у забезпеченні протиповітряної оборони держави відіграли ЗРВ як основний вогневий компонент системи ППО [5–9].

Одночасно з еволюцією тактики застосування ЗРВ відбувався розвиток інтегрованої системи ППО-ПРО України. В умовах постійного нарощування повітряних загроз особливого значення набули інтеграція різнорідних сил і засобів, створення єдиного інформаційного простору, автоматизація процесів управління та імплементація стандартів НАТО. Важливим етапом стало надходження сучасних західних повітряних та наземних платформ ППО, що дозволило підвищити ефективність боротьби з сучасними засобами повітряного нападу та забезпечити формування поступового переходу до принципів функціонування, наближених до концепції НАТО [7–9].

Аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій свідчить про підвищення уваги до питань розвитку ППО-ПРО, удосконалення управління військами та підвищення ефективності застосування зенітних ракетних комплексів. Водночас питання взаємозв'язку між етапами російсько-української війни, еволюцією повітряних загроз, розвитком тактики застосування зенітних ракетних військ та трансформацією системи ППО-ПРО України залишаються недостатньо опрацьованими, особливо в контексті сучасного бойового досвіду [7–9].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового узагальнення бойового досвіду та формування етапів еволюції тактики застосування ЗРВ у ході війни за незалежність України та трансформації набутого бойового досвіду в методичні положення щодо напрямків створення інтегрованої системи ППО-ПРО України.

Метою статті є відображення результатів аналізу еволюції тактики застосування зенітних ракетних військ у ході війни за незалежність України та визначення їх впливу на формування напрямків створення інтегрованої системи ППО-ПРО України з урахуванням набутого бойового досвіду та потенційних повітряних загроз.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання: дослідити етапи еволюції тактики застосування ЗРВ; визначити ключові фактори, що впливають на трансформацію системи ППО-ПРО; сформулювати напрямки

створення інтегрованої системи ППО-ПРО України з урахуванням набутого бойового досвіду та потенційних повітряних загроз.

Наукова новизна дослідження полягає у систематизації етапів еволюції тактики застосування ЗРВ та визначення їх впливу на трансформацію системи ППО-ПРО, а також обґрунтуванні напрямки створення інтегрованої системи ППО-ПРО України з урахуванням набутого бойового досвіду та потенційних повітряних загроз.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання органами військового управління для формування концептуальних підходів до побудови інтегрованої системи ППО-ПРО України, удосконалення нормативної бази та в навчальному процесі вищих військових навчальних закладів.

### Матеріали та методи

Під час проведення дослідження розвитку тактики застосування військових частин і підрозділів ЗРВ було здійснено комплексний аналіз досвіду їх бойового застосування у ході війни за незалежність України. Основу дослідження становили узагальнені дані відкритих джерел, аналітичні матеріали, результати наукових досліджень, а також матеріали узагальнення практичного досвіду застосування сил і засобів протиповітряної оборони в умовах сучасних бойових дій.

Дослідження базувалося на системному аналізі еволюції тактики застосування військових частин і підрозділів ЗРВ під впливом зміни характеру повітряних загроз, зростання інтенсивності повітряних ударів противника, появи нових типів ЗПН та розвитку інформаційно-мережевих принципів ведення бойових дій. Особливу увагу приділено дослідженню процесів переходу від класичної зональної системи зенітного ракетного прикриття до маневрової, багатощарової та мережецентричної моделей функціонування системи ППО-ПРО.

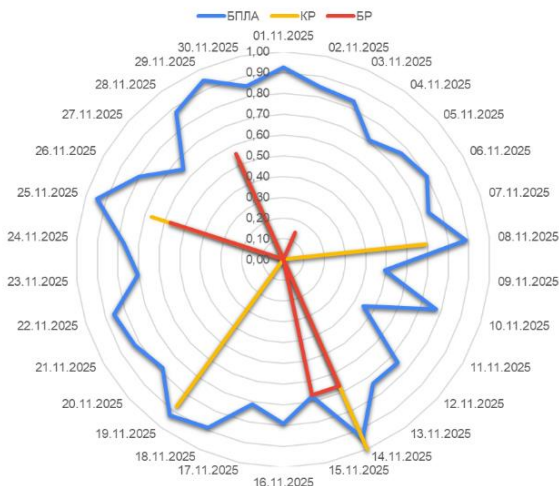
З метою систематизації отриманих результатів було застосовано метод періодизації, відповідно до якого еволюцію тактики ЗРВ умовно поділено на окремі етапи за їх функціональними ознаками, характером повітряних загроз, рівнем інтеграції різнорідних сил і засобів, а також особливостями організації бойових дій. Критеріями виділення етапів виступали:

- зміна форм і способів бойового застосування військових частин і підрозділів ЗРВ;
- рівень маневреності вогневих одиниць;
- ступінь живучості системи зенітного ракетного прикриття;
- характер побудови рубежів протиповітряної оборони;
- рівень інтеграції ЗРК різних типів у загальну систему ППО-ПРО;
- ступінь автоматизації процесів управління та цілерозподілу;
- особливості взаємодії ЗРВ, винищувальної авіації (ВА), МВГ і зенітних БпЛА-перехоплювачів;
- трансформація процесів управління бойовими діями [7–9].

Кількісна оцінка ефективності бойового застосування військових частин і підрозділів ЗРВ здійснювалася на основі узагальненого показника середньої ефективності бойових дій ( $E_{AD}$ ), що визначався (1) як відношення кількості знищених (уражених) ЗПН ( $N_{destroyed}$ ) до загальної кількості повітряних цілей, що входили до зони відповідальності військових частин і підрозділів ЗРВ ( $N_{engaged}$ ) (рис. 1) [10]:

$$E_{AD} = \frac{N_{destroyed}}{N_{engaged}}, \quad (1)$$

Для аналізу впливу окремих факторів на ефективність бойових дій було застосовано методи порівняльного аналізу, структурно-функціонального узагальнення та елементи системного підходу, що дозволило встановити залежність між етапами розвитку тактики ЗРВ та зміною рівня ефективності їх бойового застосування.



**Рисунок 1** – Приклад визначення середньої ефективності ППО за типами ЗПН (жовтень 2025 року)

Система ЗРП розглядалася як складна багаторівнева система, ефективність якої визначається не лише характеристиками окремих ЗРК, а й рівнем інтеграції розвідувальних, інформаційних, управлінських та вогневих елементів у єдину систему ППО-ПРО [11, 13].

Окремо досліджувалися процеси інтеграції іноземних ЗРК у наявну систему ППО України, особливості реалізації принципу “централізоване управління – децентралізоване виконання”, а також вплив мережецентричних підходів на підвищення ефективності бойових дій. Значна увага приділялася аналізу формування багатошарової системи оборони, розвитку МВГ, взаємодії винищувальної авіації із ЗРВ та зростанню ролі зенітних БпЛА-перехоплювачів у системі боротьби з малорозмірними повітряними цілями.

Таким чином, застосований комплекс методів забезпечив можливість всебічного аналізу еволюції тактики застосування військових частин і підрозділів ЗРВ в умовах сучасної війни та дозволив визначити чотири умовні етапи її розвитку.

### І ЕТАП. Класична зональна система ЗРП

(24.02.2022 – 04.2022 р.)

Етап характеризувався перебудовою концепції застосування ЗРК від традиційного розгортання військових частин і підрозділів ЗРВ у визначених позиційних районах з метою прикриття важливих державних та військових об’єктів до здійснення маневрових дій, дій з засадних позицій з метою створення прихованої системи вогню та збереження вогневого потенціалу. Бойові дії цього періоду відбувалися в умовах надзвичайно високої інтенсивності повітряних ударів противника, спрямованих насамперед на подавлення системи ППО України.

Характерною особливістю етапу стало активне застосування противником протирадіолокаційних ракет, оперативно-тактичних ракет та інших засобів високоточної зброї для ураження позицій ЗРВ. Значна щільність ракетно-авіаційних ударів по позиційних районах зумовила необхідність постійного відновлення боєздатності ЗРК та оперативного розгортання системи зенітного ракетного прикриття.

Управління бойовими діями здійснювалося переважно централізовано та неавтоматизовано, а основною організаційною одиницею залишався зенітний ракетний дивізіон (окрема вогнева одиниця). Проте, необхідно зауважити, що функціонування підсистеми ЗРП в системі ППО відбувалося в умовах інтенсивного вогневого, радіоелектронного та інформаційно-технічного впливу противника, що призводило до необхідності ведення самостійних бойових дій підрозділами (окремими вогневими одиницями) ЗРВ у задалегідь призначених секторах стрільби.

Виявлення повітряних цілей здебільшого забезпечувалося штатними радіолокаційними засобами самих ЗРК, що визначало відносно автономний характер їх бойового застосування.

Особливості тактики застосування ЗРК полягали у тривалій роботі радіолокаційних станцій в активному режимі та використанні зон ураження відповідно до тактико-технічних характеристик комплексів. Водночас уже на цьому етапі розпочалася поступова адаптація тактики бойового застосування окремих ЗРК, насамперед ЗРК БУК, які почали активно використовувати маневр в межах системи позицій, засадні дії та полювання на ЗПН противника.

Крім того, удари противника по аеродромах, позиціях та розташуванню військових частин (підрозділів) зенітних ракетних та радіотехнічних і спеціальних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, вплинули на бойове застосування та взаємодію ЗРВ та ВА. У зазначений період почало формуватися поєднання бойового застосування ЗРК БУК із ВА двома ешелонами. На початковому етапі зазначеного періоду перший ешелон формувала ВА, а другий – ЗРВ. Березень 2022 року характеризувався зміною тактики застосування повітряного противника, зокрема дією ударних груп авіації противника під прикриттям винищувачів, що в свою чергу змусило ВА зайняти другий ешелон оборони, а ЗРК БУК – зайняти перший. Зенітні ракетні комплекси активно застосовували елементи засадних дій із

короткочасним виходом на позицію та раптовим відкриттям вогню по повітряних цілях.

Водночас така модель бойового застосування ЗРК мала низку суттєвих недоліків, зокрема обмежену маневреність більшості підрозділів та підвищену вразливість до протирадіолокаційних ракет і оперативно-тактичних ракет противника [12, 14-16]. Крім того, традиційна структура та способи застосування сил і засобів ЗРВ виявилися недостатньо ефективними проти нових типів повітряних загроз, насамперед малорозмірних безпілотних літальних апаратів.

Основними типами повітряних цілей були:  
літаки тактичної авіації;  
крилаті ракети;  
вертольоти.

Середня ефективність бойових дій становила: 0,35–0,50 [7-9].

### II ЕТАП. Маневрена та живуча система ЗРП (друга половина 2022 – 2023 рр.)

Другий етап еволюції тактики застосування ЗРВ характеризувався переходом від стаціонарної моделі бойового застосування до більш маневреної та адаптивної системи ведення бойових дій. Основною рисою цього етапу стало формування маневрової системи ППО, побудованої на постійному маневрі вогневих засобів та скороченні часу їх перебування на позиціях.

Тактика застосування ЗРВ почала базуватися на принципах розосередження, скорочення часу роботи радіолокаційних станцій та використання засідок із переходом до короткочасного включення засобів виявлення. Значного поширення набуло використання тактики “shoot-and-scoot”, що передбачала відкриття вогню з подальшою негайною зміною позиції [14, 15]. Однією з характерних особливостей застосування самохідних вогневих установок (СВУ) ЗРК БУК у складі тактичних пар. Такий підхід забезпечував реалізацію взаємного вогневого прикриття та підвищення живучості підрозділів в умовах інтенсивного вогневого впливу повітряного противника. Після виконання бойового завдання та здійснення пусків ракет одна із СВУ виконувала маневр на запасну позицію, тоді як інша здійснювала розвідку та забезпечувала прикриття від можливих ударів повітряного противника. Практика бойового застосування підтвердила ефективність такого способу дій в умовах інтенсивного використання противником засобів повітряної розвідки та високоточної зброї.

Водночас відбулося активне використання хибних позицій, маскування та маневру вогневих засобів. Елементи ЗРК – радіолокаційні станції, пускові установки та пункти управління – дедалі частіше розосереджувалися на значні відстані, що дозволяло підвищити живучість угруповань ЗРВ.

Характерною особливістю етапу стало створення суцільного рубежу оборони, у межах якого перший рубіж формували ЗРК БУК, другий – ЗРК С-300, а третій – ВА. Такий підхід дозволив підвищити стійкість системи ППО та забезпечити послідовне ураження повітряних цілей на різних рубежах в тому числі і в глибині території України.

Разом із підвищенням мобільності підрозділів виникли нові труднощі, пов'язані зі зниженням ефективності виявлення повітряних цілей унаслідок обмеженого часу роботи радіолокаційних засобів та складністю організації управління розосередженими підрозділами [12, 14-16]. Крім того, поступово зростала роль нових типів повітряних загроз, насамперед ударних БпЛА, що вимагало подальшої адаптації системи ЗРП. У цей період розпочалося формування та бойове застосування МВГ як додаткового елемента системи ППО, призначеного для боротьби з малорозмірними та маловисотними повітряними цілями. Залучення МВГ дозволило підвищити ефективність протидії БпЛА, раціональніше використовувати ресурс ЗРК та забезпечити ешелонування системи ППО.

У зазначений період підвищення середньої ефективності бойових дій було досягнуто переважно за рахунок підвищення живучості підрозділів, гнучкості їх застосування, активного маневру вогневих засобів, нарощування та активного застосування МВГ.

Основними типами повітряних цілей були::  
крилаті ракети;  
протирадіолокаційні ракети;  
ударні БпЛА.

Середня ефективність бойових дій становила: 0,45–0,60 [7-9].

### III ЕТАП. Багатошарова система ЗРП та формування протиракетної оборони (2023 – 2024 рр.)

Третій етап розвитку тактики застосування ЗРВ характеризувався формуванням багатошарової системи бойового застосування сил і засобів ЗРВ, у межах якої різномірні комплекси та системи ураження використовувалися для боротьби з різними типами повітряних цілей на різних дальностях і висотах.

На цьому етапі відбулося активне поєднання ЗРК дальньої, середньої та малої дальності, а також засобів ближньої дії, що забезпечило створення кількох послідовних рубежів перехоплення, у тому числі балістичних цілей. Важливим напрямом розвитку стало формування елементів протиракетної оборони [11, 13].

Характерною особливістю етапу стало поступове впровадження іноземних ЗРК у наявну систему ППО України. Водночас інтеграція іноземних комплексів супроводжувалася значними труднощами, пов'язаними з різними принципами побудови, управління та бойового застосування ЗРК радянського та західного виробництва [12, 14-16].

Управління бойовими діями різномірних (змішаних) угруповань ЗРВ на початковому етапі інтеграції здійснювалося переважно неавтоматизовано, значною мірою голосом, із використанням системи “Віраж-Планшет”. Це вимагало високого рівня координації між підрозділами, збільшувало навантаження на органи управління та ускладнювало процес оперативного розподілу цілей в умовах швидкоплинної повітряної обстановки. Водночас розпочалося активне впровадження та застосування автоматизованої системи управління (АСУ) “Ореанда”, яка забезпечила розширення

можливостей щодо збору, оброблення та обміну інформацією про повітряну обстановку між різнорідними силами і засобами ППО. Використання АСУ сприяло скороченню часу циклу управління та підвищенню оперативності прийняття рішень. З іншого боку, активний інформаційно-технічний вплив противника на систему управління, зокрема спроби порушення функціонування каналів зв'язку та передачі даних, зумовив необхідність пошуку альтернативних способів управління бойовими діями. За цих умов відбувалося застосування планшетів загальної повітряної обстановки та управління вогнем. Практика їх застосування підтвердила доцільність збереження та подальшого розвитку резервних способів управління як важливого елемента забезпечення стійкості системи управління в умовах сучасної війни.

Значного поширення набуло застосування МВГ, призначених насамперед для боротьби з малорозмірними безпілотними літальними апаратами та іншими малозшвидкісними повітряними цілями.

Головним принципом побудови багатозарової системи стало забезпечення раціонального розподілу повітряних цілей між різними засобами ураження, за якого кожна ціль повинна знищуватися найбільш доцільним та економічно ефективним засобом.

Таблиця 1

Структура шарів системи ЗРП, що сформувалася на III етапі

Шар оборони	Основні засоби	Типи цілей
дальній	ЗРК дальньої дії	балістичні ракети, ЗПН за ЛБЗ
середній	ЗРК середньої дальності	КР
ближній	ЗРК малої дальності	БпЛА II класу, КР, КАБ
надближній	Зенітна артилерія (МВГ), РЕБ	БпЛА I та II класу

Разом із розширенням структури системи ЗРП зросла складність координації дій різнорідних сил і засобів, що вимагало подальшого вдосконалення системи управління та розподілу повітряних цілей між вогневими засобами. Крім того, значною проблемою залишалася необхідність забезпечення достатньої щільності багатозарової системи вогню та раціонального використання обмежених запасів зенітних керованих ракет.

Незважаючи на це, створення багаторівневої системи перехоплення дозволило суттєво підвищити ефективність бойових дій ЗРВ.

Середня ефективність бойових дій становила: 0,60–0,75 [7–9, 11, 13].

IV ЕТАП. Мережецентрична система ЗРП (2024 р. – по теперішній час)

Четвертий етап розвитку тактики застосування ЗРВ характеризується переходом до мережецентричної моделі системи ЗРП у складі єдиної системи ППО–ПРО.

Основною особливістю цього етапу стало формування єдиної інформаційно-вогневої

системи, у межах якої різнорідні радіолокаційні станції, автоматизовані системи управління, винищувальна авіація, засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ), МВГ, зенітні БпЛА-перехоплювачі та вогневі одиниці ЗРВ інтегруються в єдину систему управління.

Важливим організаційним кроком у розвитку єдиної системи ППО–ПРО стало створення у складі Повітряних Сил окремих командувань авіації, ЗРВ та ПРО, Сил безпосереднього протиповітряного прикриття, що забезпечило централізацію управління, підвищення ефективності їх взаємодії та координації бойового застосування. Така організаційна трансформація сприяла більш ефективній інтеграції авіаційного, зенітного ракетного та протиракетного прикриття у єдину систему протидії повітряним загрозам, а також створила передумови для подальшого розвитку багаторівневої системи ППО–ПРО.

Окремим напрямом розвитку стало поступове підвищення ролі зенітних БпЛА-перехоплювачів як нового засобу боротьби з повітряними цілями (Рис. 2, 3).

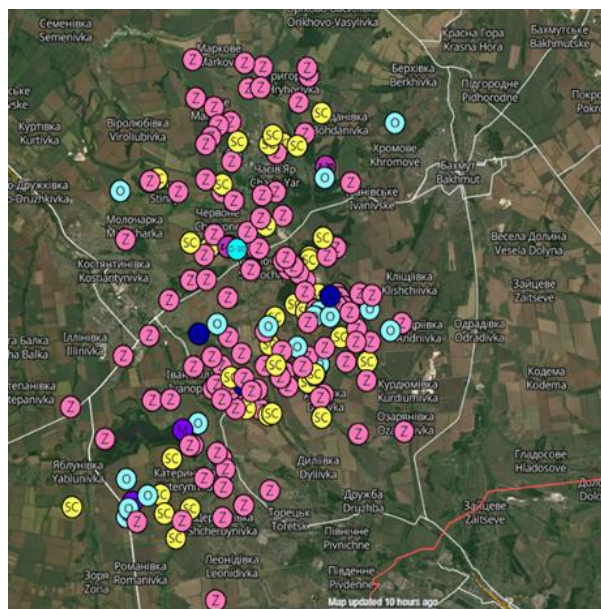


Рисунок 2 – Інтерактивна карта місць та типів перехоплених БпЛА противника [13]

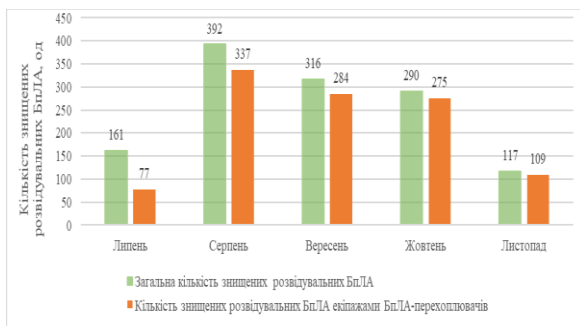
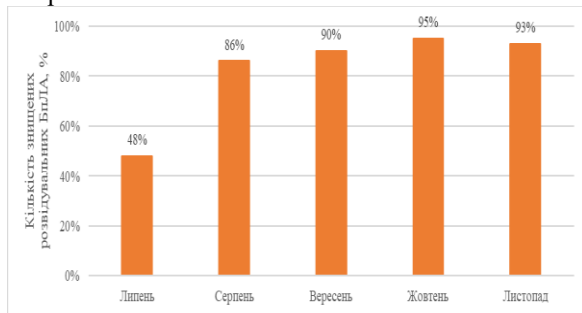


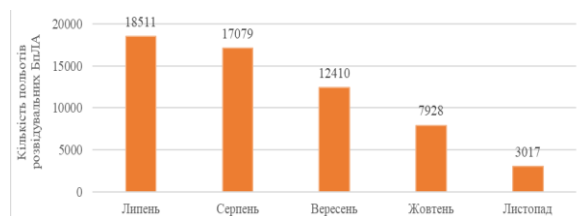
Рисунок 3 – Порівняльна оцінка загальної кількості знищених розвідувальних БпЛА засобами ОСУВ та кількості знищених розвідувальних БпЛА екіпажами зенітних БпЛА-перехоплювачів за місяцями 2024 року [13]

Провівши аналіз інтерактивної карти [13], можна зробити висновок, що збільшення кількості застосування зенітних БпЛА-перехоплювачів

(рис. 3) та долю у знищенні (ураженні) розвідувальних БпЛА противника (рис. 4) призвели до значного скорочення їх використання зс рф (рис. 5), що доказує високу ефективність нового напрямку боротьби з малорозмірними БпЛА противника зенітними БпЛА-перехоплювачами.



**Рисунок 4** – Доля знищених розвідувальних БпЛА екіпажами зенітних БпЛА-перехоплювачів за місяцями 2024 року



**Рисунок 5** – Динаміка зміни інтенсивності польотів розвідувальних БпЛА (за даними сил та засобів РЕБ) за місяцями 2024 року

Важливим напрямом розвитку стало удосконалення взаємодії між винищувальною авіацією та ЗРВ із інтеграцією у систему оповіщення та цілерозподілу. Це дозволило забезпечити чітке визначення повітряних цілей, їх розподіл між засобами ураження та підвищити ефективність бойового застосування різномірних компонентів ППО-ПРО [12, 14-16].

На цьому етапі сформовано декілька послідовних рубежів оборони, до складу яких входять зенітні БпЛА-перехоплювачі, МВГ, ВА та угруповання ЗРВ. Також, армійська та легкомоторна авіація почали активно залучатися до протидії ударним і розвідувальним БпЛА противника, насамперед на малих висотах та поза зонами застосування наземних засобів ППО. Поєднання всіх засобів у межах єдиного контуру управління забезпечило підвищення узгодженості бойових дій, більш раціональний розподіл повітряних цілей між вогневими засобами різних типів та створення багатошарової комплексної системи ППО.

Окремого значення набуло використання принципу “централізоване управління – децентралізоване виконання”, що активно застосовується під час бойового використання ЗРК PATRIOT та NASAMS. Такий підхід забезпечує високу гнучкість системи ЗРП та дозволяє оперативно реагувати на зміни повітряної обстановки.

Йде стрімке зростання ролі зовнішнього цілевказання, автоматизованих систем управління та інтеграції різних джерел інформації про повітряну обстановку. Водночас важливим

напрямом розвитку стало підвищення ролі зенітних БпЛА-перехоплювачів як нового ефективного засобу боротьби з малорозмірними повітряними цілями.

Разом із тим мережецентрична модель системи ЗРП висуває підвищені вимоги до стійкості каналів зв'язку, швидкості обробки інформації та сумісності різномірних систем і комплексів. Значну загрозу становлять засоби радіоелектронного впливу та кібернетичні атаки, здатні порушити функціонування інформаційної мережі системи оборони.

Основними типами повітряних цілей були:

- крилаті ракети;
- балістичні ракети;
- ударні та розвідувальні БпЛА;
- реактивні БпЛА.

Середня ефективність бойових дій становила: 0,70–0,90 [7–9, 11, 13].

### Результати

З метою визначення основних напрямів розвитку системи ППО-ПРО було досліджено характерні риси, тактичні особливості та основні проблеми бойового застосування військових частин і підрозділів ЗРВ на різних етапах війни за незалежність України.

Перший етап еволюції тактики застосування ЗРВ характеризувався перебудовою концепції застосування ЗРК від розгортання військових частин і підрозділів ЗРВ у визначених позиційних районах до здійснення маневрових дій а також дій з засадних позицій з метою створення прихованої системи вогню та збереження вогневого потенціалу. Управління бойовими діями здійснювалося переважно централізовано та неавтоматизовано, а основною організаційною одиницею залишався зенітний ракетний дивізіон (окрема вогнева одиниця). Проте, в умовах інтенсивного вогневого, радіоелектронного та інформаційно-технічного впливу противника, підрозділи (окремі вогневі одиниці) ЗРВ вели самостійні бойові дії у заздалегідь призначених секторах стрільби.

Виявлення та супроводження повітряних цілей забезпечувалося здебільшого штатними радіолокаційними засобами самих ЗРК, що визначало відносно автономний характер їх бойового застосування (табл. 2).

- Характерними рисами першого етапу були:
- недопущення панування противника в повітрі;
  - виведення з під удару підрозділів ЗРВ;
  - розосередження зенітного ракетного озброєння;
  - збереження вогневого потенціалу;
  - тривала робота радіолокаційних станцій в активному режимі;
  - використання класичних зон ураження відповідно до тактико-технічних характеристик ЗРК;
  - орієнтація на боротьбу з літаками тактичної авіації, крилатими ракетами та вертольотами;
  - висока інтенсивність ракетно-авіаційних ударів противника по системі ППО;
  - активне застосування противником протирадіолокаційних ракет;

Таблиця 2

## Середня ефективність бойових дій за етапами

Етап	Період, роки	Тактичні інновації	Ключові технологічні та організаційні зміни	Основні загрози	Середня ефективність	Пріріст ефективності
I	2022	Стаціонарні позиції, централізоване управління	Використання штатних РЛС комплексів, обмежена інтеграція сенсорів	Літаки, вертольоти, КР	0,35–0,50	базовий
II	2022–2023	Маневр позицій, <i>shoot-and-scoot</i> , засідки	Підвищення мобільності підрозділів ЗРВ, скорочення часу роботи РЛС	КР, ПРР, БпЛА	0,45–0,60	+15–20%
III	2023–2024	Багатошарова система, розподіл цілей	Інтеграція різнорідних ЗРК, активне застосування МВГ проти БпЛА	КР, БпЛА, ОТР	0,60–0,75	+20–25%
IV	2024 – дотепер	Мережецентрична інтеграція, зовнішнє цілевказання	Створення мережевої системи управління, створення системи зенітних БпЛА-перехоплювачів, підвищення ролі автоматизованих систем управління	Комбіновані удари	0,70–0,90	+15–20%

поступове впровадження маневрових дій окремих ЗРК, насамперед комплексів БУК; використання засадних дій ЗРК; формування двошарової взаємодії між ЗРК БУК та ВА.

Основними проблемами першого етапу були: висока інтенсивність застосування протирадіолокаційних ракет противника; значна загроза ураження позицій ЗРВ оперативними ракетами та іншими засобами високоточної зброї;

обмежені можливості маневру та маскуванню підрозділів; складність підтримання боєздатності угруповань ЗРВ в умовах інтенсивного вогневого впливу;

нерациональне застосування ЗРК середньої та малої дальності для боротьби з ударними БпЛА за критерієм “ефективність-вартість”;

обмежений рівень інтеграції різних джерел інформації про повітряну обстановку.

Другий етап розвитку тактики застосування ЗРВ характеризувався переходом до маневреної та живучої системи ЗРП. Основою бойового застосування ЗРВ стало активне використання маневру ЗРК, скорочення часу перебування на позиціях та підвищення живучості вогневих засобів.

Основними рисами та тактичними особливостями другого етапу були:

відновлення системи управління;  
відновлення зенітного ракетного озброєння;  
формування маневрової системи ППО;  
активне використання тактики “shoot-and-scoot”;  
скорочення часу роботи радіолокаційних станцій;  
широке застосування засідок ЗРК із режимом радіомовчання;  
розосередження елементів ЗРК на значні відстані;

використання хибних позицій і макетів ЗРК;  
підвищення мобільності бойових порядків;  
створення суцільного рубежу оборони, де перший рубіж формували маневрові дії ЗРК БУК, а другий – ЗРК С-300;

поступове розширення взаємодії між різнорідними засобами ППО та джерелами інформації про повітряну обстановку.

Основними проблемами другого етапу були:

обмежені можливості виявлення повітряних цілей при скороченні часу роботи радіолокаційних станцій (РЛС);

залежність ефективності бойових дій від зовнішнього цілевказання;

складність організації управління розосередженими підрозділами;

зростання навантаження на систему управління через постійний маневр;

недостатня ефективність окремих ЗРК проти масового застосування ударних БпЛА;

обмеженість запасів зенітних керованих ракет.

Третій етап розвитку тактики застосування ЗРВ характеризувався формуванням багатошарової системи ЗРП та розвитком елементів протиракетної оборони. На цьому етапі відбулося активне поєднання різнорідних ЗРК дальньої, середньої та малої дальності, а також засобів ближньої дії в єдину систему їх бойового застосування.

Основними рисами та тактичними особливостями третього етапу були:

наращування системи ЗРП за рахунок відновленого зенітного ракетного озброєння, надходження ЗРК іноземного виробництва;

формування багатошарової структури системи ЗРП;

створення декількох послідовних рубежів перехоплення повітряних цілей;

інтеграція іноземних ЗРК у систему ППО України;

формування елементів протиракетної оборони; раціональний розподіл повітряних цілей між різними засобами ураження;

активне застосування МВГ для боротьби з БпЛА;

розширення взаємодії між ЗРВ, винищувальною авіацією та засобами РЕБ;

використання системи “Віраж-Планшет” для координації дій різнорідних угруповань;

поступове впровадження елементів автоматизації управління.

Основними проблемами третього етапу були:  
складність координації дій різнорідних засобів ППО;

труднощі інтеграції іноземних ЗРК через різні принципи побудови та управління;

переважно неавтоматизований характер управління бойовими діями;

ризик дублювання вогню по одній цілі;  
перевантаження систем управління під час комбінованих ударів;

необхідність забезпечення достатньої щільності багатошарової системи оборони;

обмеженість запасів зенітних керованих ракет.

Четвертий етап характеризується переходом до мережецентричної системи ЗРП у складі єдиної системи ППО-ПРО. Основою бойового застосування ЗРВ стала інтеграція різнорідних сенсорів, автоматизованих систем управління та вогневих засобів у єдину інформаційно-вогневу мережу.

Основними рисами та тактичними особливостями четвертого етапу є:

формування мережецентричної структури системи ЗРП;

інтеграція різнорідних радіолокаційних, оптико-електронних та розвідувальних засобів;

активне використання зовнішнього цілевказання;

розділення функцій виявлення, супроводження та ураження цілей між різними елементами системи;

централізоване управління із децентралізованим виконанням бойових завдань;

удосконалення взаємодії між ЗРВ та винищувальною авіацією;

формування багаторівневих рубежів оборони із залученням зенітних БпЛА-перехоплювачів, МВГ, ВА, ЗРВ, армійської та легкомоторної авіації;

формування командування ЗРВ та ПРО;

активне застосування ЗРК іноземного виробництва (PATRIOT, NASAMS, IRIS-T, MIM-23 HAWK);

створення комплексної об'єктової ППО;

стрімке зростання ролі зенітних БпЛА-перехоплювачів у боротьбі з малорозмірними повітряними цілями.

Основними проблемами четвертого етапу є:

висока залежність ефективності системи від стійкості каналів зв'язку та обміну даними;

вразливість інформаційної мережі до радіоелектронного впливу та кібернетичних загроз;

складність забезпечення сумісності різнорідних засобів ППО різного походження;

значні вимоги до швидкості обробки інформації;

необхідність високого рівня автоматизації та підготовки персоналу;

складність забезпечення стійкого функціонування мережецентричної системи в умовах масованих комбінованих ударів.

### **Обговорення**

Отримані результати дослідження свідчать про наявність стійкої тенденції трансформації тактики застосування ЗРВ у сучасних збройних конфліктах та підтверджують, що розвиток системи ППО-ПРО

України відбувається у напрямі формування інтегрованої багатошарової та мережецентричної системи оборони. Встановлено, що еволюція тактики застосування ЗРВ під час війни за незалежність України фактично відображає практичну реалізацію ключових напрямів стратегічного розвитку системи ППО-ПРО держави. При цьому авіаційна складова поступово набуває ролі не лише допоміжного, а повноцінного елемента багаторівневої системи ППО.

Проведений аналіз дозволив встановити, що на початковому етапі війни класична зональна модель системи ЗРП виявилася недостатньо стійкою в умовах інтенсивного вогневого впливу противника, активного застосування протирадіолокаційних ракет, оперативно-тактичних ракет та масованих комбінованих повітряних ударів.

На початковому етапі широкомасштабного вторгнення значна частина завдань із відбиття повітряних ударів противника покладалася на винищувальну авіацію. Проте зі зміною характеру повітряних загроз, зростанням масштабів застосування крилатих і балістичних ракет, а також БпЛА, відбулося поступовий перерозподіл функцій між компонентами системи ППО. Основне навантаження щодо знищення ЗПН було покладено на ЗРВ, які стали основним вогневим компонентом системи ППО-ПРО. При цьому винищувальна авіація зберегла важливу роль у виконанні завдань з ППО.

Таким чином, вже на ранніх етапах війни відбулося формування основ адаптивної системи ППО-ПРО, здатної реагувати на зміну характеру повітряних загроз.

Подальший розвиток тактики застосування ЗРВ характеризувався формуванням маневрової системи ППО, у межах якої ключового значення набули живучість угруповань, розосередження елементів ЗРК та постійний маневр вогневих засобів. Отримані результати підтверджують, що забезпечення стійкості та живучості системи ППО-ПРО в умовах інтенсивного вогневого та радіоелектронного впливу противника є одним із визначальних факторів ефективності бойових дій. Це безпосередньо відповідає стратегічним напрямкам розвитку системи ППО-ПРО щодо створення адаптивної інтегрованої системи оборони та забезпечення її стійкого функціонування в умовах активної протидії противника.

Встановлено, що одним із ключових результатів еволюції тактики застосування ЗРВ стало формування багатошарової системи ППО. Інтеграція ЗРК різної дальності дії, винищувальної та армійської авіації, мобільних вогневих груп, засобів РЕБ та зенітних БпЛА-перехоплювачів забезпечила створення декількох послідовних рубежів оборони. Особливого значення набула взаємодія типу "ЗРВ-авіація", зокрема у форматі розподілу цілей між ешелонами ураження та взаємного доповнення зон дії. Важливою особливістю розвитку системи ППО стало об'єднання в єдиному контурі управління повітряних і наземних платформ різних поколінь, як радянського, так і іноземного виробництва, що

відрізнялися за тактико-технічними характеристиками, принципами функціонування та рівнем автоматизації. Незважаючи на технічну неоднорідність, їх інтеграція дозволила суттєво розширити спроможності системи ППО, підвищити гнучкість застосування сил і засобів та забезпечити більш ефективне використання наявного потенціалу озброєння. Такий підхід дозволив суттєво підвищити ефективність боротьби з комбінованими повітряними ударами та реалізувати принцип раціонального розподілу повітряних цілей між різнорідними засобами ураження у всьому діапазоні висот (МВГ, АА, ВА, ЗРК).

Слід зауважити, що на етапі формування багатопарової системи ППО винищувальна авіація стала невід'ємним елементом побудови багаторівневої оборони. Її роль посилилася у частині перехоплення крилатих ракет, боротьби зокремими групами повітряних цілей та забезпечення гнучкого реагування на зміну повітряної обстановки. Інтеграція авіації з ЗРК середньої та великої дальності дозволила створити кілька послідовних рубежів ураження, що підвищило загальну стійкість системи ППО-ПРО тому, подальший розвиток системи ППО-ПРО став неможливий без створення єдиної інтегрованої архітектури оборони, побудованої на основі єдиного інформаційного поля та інтеграції різнорідних засобів виявлення, управління і ураження. У ході Війни за незалежність України відбулося поступове формування передумов для створення єдиної АСУ з відкритою архітектурою, здатної забезпечити інтеграцію ЗРК радянського, іноземного та перспективного виробництва.

Особливого значення набув процес інтеграції іноземних ЗРК у наявну систему ППО України. Проведений аналіз показав, що цей процес супроводжувався певними труднощами через різні принципи побудови, управління та бойового застосування радянських і західних ЗРК. Водночас саме бойовий досвід війни підтвердив необхідність досягнення інтероперабельності з системами ППО-ПРО держав-членів НАТО та інтеграції різнорідних ЗРК у єдину систему управління.

Подальший розвиток тактики застосування ЗРВ привів до переходу від переважно неавтоматизованого управління до мережецентричної моделі системи ППО-ПРО. На сучасному етапі ключового значення набуває інтеграція автоматизованих систем управління, зовнішнього цілевказання, систем дальнього радіолокаційного виявлення, радіолокаційних та оптико-електронних засобів, винищувальної авіації, АА, ЗРК, МВГ, зенітних БпЛА-перехоплювачів та РЕБ у єдину інформаційно-вогневу систему. Це забезпечує реалізацію принципу централізованого управління із децентралізованим виконанням бойових завдань, що активно застосовується під час бойового використання сучасних ЗРК PATRIOT та NASAMS.

Отримані результати свідчать, що формування мережецентричної системи ЗРП фактично є переходом до багатодоменної моделі оборони

держави, у межах якої забезпечується узгоджена взаємодія між силами та засобами ЗРВ, ВА, РЕБ, безпосереднього протиповітряного прикриття, безпілотних систем та інших складових сил оборони. Впровадження зазначеної моделі, що ґрунтується на досвіді Війни за Незалежність України, сприяло перегляду фахівцями держав-членів НАТО окремих концептуальних положень щодо побудови своїх систем ППО-ПРО з урахуванням сучасних викликів і характеру бойових дій.

Важливим результатом дослідження є підтвердження зростання ролі нових засобів боротьби з повітряними загрозами, насамперед МВГ та зенітних БпЛА-перехоплювачів. Їх поява свідчить про формування нової моделі системи ППО-ПРО, орієнтованої на поєднання високотехнологічних та відносно дешевих засобів ураження для боротьби з масовими малорозмірними повітряними цілями.

Разом із тим результати дослідження свідчать, що подальший розвиток інтегрованої системи ППО-ПРО супроводжується виникненням нових викликів. Зростає залежність ефективності бойових дій від стійкості каналів зв'язку, швидкості обміну інформацією, рівня автоматизації та сумісності різнорідних систем. Значну загрозу становлять засоби радіоелектронного впливу та кібернетичні атаки, здатні порушити функціонування єдиної інформаційної мережі. Крім того, створення багатопарової та мережецентричної системи ППО-ПРО потребує значних ресурсів, модернізації наявного озброєння, придбання нових зразків ОВТ та розвитку системи підготовки персоналу, здатного діяти в умовах інтегрованої багатодоменної оборони.

### **Висновки**

У результаті проведеного дослідження встановлено, що еволюція тактики застосування ЗРВ у війні за незалежність України має чітко виражений поетапний та системний характер і виступає одним із ключових факторів трансформації системи ППО-ПРО держави. Динамічна зміна характеру повітряних загроз, зростання інтенсивності комбінованих ракетно-авіаційних ударів та масове застосування БпЛА обумовили послідовний перехід від класичної зональної моделі до маневреної, багатопарової та мережецентричної системи зенітного ракетного прикриття.

Виділено чотири основні етапи розвитку тактики застосування ЗРВ: класична зональна система ЗРП, маневрена живуча система ЗРП, багатопарова інтегрована система ЗРП із елементами протиракетної оборони та мережецентрична система ППО-ПРО. Кожен із зазначених етапів характеризується специфічними способами ведення бойових дій, рівнем мобільності вогневих засобів, ступенем інтеграції різнорідних засобів виявлення та ураження, а також особливостями взаємодії між елементами системи оборони.

Встановлено, що ключовими факторами підвищення ефективності бойового застосування ЗРВ є зростання маневреності підрозділів,

підвищення живучості в умовах інтенсивного вогневого та радіоелектронного впливу, а також формування багаторівневої структури зенітного ракетного прикриття. Доведено, що перехід до багатощарових і мережецентричних моделей забезпечує реалізацію синергетичного ефекту за рахунок узгодженого застосування різнорідних засобів ураження на різних дальностях і висотах.

Обґрунтовано, що суттєвого впливу на трансформацію системи ППО-ПРО завдала інтеграція іноземних зенітних ракетних комплексів у наявну структуру оборони, що потребувало адаптації підходів до їх бойового застосування та забезпечення сумісності різнорідних систем. Водночас створення командувань авіації, ЗРВ та ПРО, Сил безпосереднього протиповітряного прикриття стало одним із визначальних чинників підвищення ефективності взаємодії між підрозділами ЗРВ, винищувальною авіацією, мобільними вогневими групами та іншими елементами системи ППО-ПРО.

Виявлено, що сучасний етап розвитку характеризується формуванням єдиної інтегрованої інформаційно-вогневої системи, побудованої на принципах централізованого управління із децентралізованим виконанням завдань, що відповідає загальним тенденціям розвитку багатодоменної оборони та підходам держав-членів НАТО. Особливе значення набуває розвиток МВГ та зенітних БпЛА-перехоплювачів як ефективних і економічно доцільних засобів протидії масовим малорозмірним повітряним цілям та основи формування підрозділів Сил безпосереднього протиповітряного прикриття.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що еволюція тактики застосування ЗРВ у війні за незалежність України має системний характер та відображає загальні тенденції стратегічного розвитку системи ППО-ПРО України. Подальший розвиток системи ППО-ПРО відбувається через посилення інтеграції ЗРВ та ВА в єдину багаторівневу, інтегровану та мережецентричну архітектуру, здатну ефективно протидіяти сучасним і перспективним засобам повітряного нападу.

### Список використаних джерел

- [1.] Головнокомандувач ЗС України, "Офіційний канал в Telegram". [Електронний ресурс]. Доступно: <https://t.me/CinCAFU>
- [2.] Генеральний штаб ЗС України, "Офіційна сторінка в Facebook". [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua>
- [3.] Повітряні Сили ЗС України, "Офіційний канал в Telegram". [Електронний ресурс]. Доступно: <https://t.me/s/kpszsua>
- [4.] Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, "Офіційні публічні сторінки". [Електронний ресурс]. Доступно:

- [5.] <https://sites.google.com/view/uaairforce>  
В. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (січень 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [6.] В. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін., Воєнно-історичний опис російсько-української війни (лютий 2023 року): військова публікація. Київ, Україна: МОУ, ГШ ЗС України, 2023.
- [7.] М. А. Левченко та ін., Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України у російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року): навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2024.
- [8.] Б. Ж. Шкурят та ін., Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України у російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року): навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2024.
- [9.] Б. Ж. Шкурят та ін., Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння: навч. посіб., А. Г. Салій, Ред. Київ, Україна: НУОУ, 2024.
- [10.] О. В. Глоба, А. Г. Салій, В. Г. Паталаха та ін., Застосування повітряної компоненти об'єднаних сил: навч. посіб., О. М. Шинкарук, Ред. Київ, Україна: НУОУ, 2025.
- [11.] "Втрати російської армії в Україні," Minfin. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://index.minfin.com.ua/ua/russian-invading/casualties>
- [12.] "Українська протиповітряна оборона: сучасний стан та перспективи розвитку," Mezha. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://mezha.net/ua/bukvy/ukraine-s-advanced-air-defense-system-evolution-challenges-and-future>
- [13.] "Дата та місця перехоплень БпЛА противника," UKR Daily Update. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://map.ukrdailyupdate.com>
- [14.] "Ukrainian Pillar for a Modern Air Defence Architecture," SAHA SEC. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://sahasec.org/policy-briefs/ukrainian-pillar-for-a-modern-air-defence-architecture>
- [15.] "Ukraine's Air Defence Evolution from Soviet Legacy to NATO Integration," Lviv Herald. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.lvivherald.com/post/ukraine-s-air-defence-evolution-from-soviet-legacy-to-nato-integration>
- [16.] "Ukraine is leveraging its powerful – and cheap – new drone killers for air defense," AP News. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://apnews.com/article/russia-ukraine-war-interceptors-drones-nato-c7b57962e573b344490b07b2cfead856>
- [17.] "Ukraine is using powerful quadcopters to destroy nearly a third of all the Russian air threats it hits, commander says," Business Insider. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.businessinsider.com/interceptor-drones-destroy-third-russian-air-threats-shahed-quadcopters-commander-2026-2>

<sup>1</sup>Anatolii Kryvonozhko (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-1470-7301>

<sup>2</sup>Dmytro Riezniak (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

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

<sup>2</sup>Valerii Patalakha (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

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

<sup>2</sup>Yurii Horobets (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

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

<sup>1</sup>Air Force Command of UA Armed Force, Vinnytsia, Ukraine

<sup>2</sup>The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## EVOLUTION OF TACTICS OF THE APPLICATION OF ANTI-AIR MISSILES AS A FACTOR IN THE TRANSFORMATION OF THE AIR AND MISSILE DEFENSE SYSTEM OF UKRAINE IN THE WAR FOR INDEPENDENCE

*The article examines the evolution of the employment tactics of ground-based air defense as one of the key factors in transforming the integrated air and missile defense system during Ukraine's War for Independence.*

*It identifies the primary factors shaping the forms and methods of combat employment for ground-based air defense units. These include enhancing the maneuverability and survivability of ground-based air defense units and subunits; integrating heterogeneous fires and reconnaissance assets into a unified ground-based air defense coverage; developing a layered defense structure; improving interoperability among ground-based air defense units, fighter and army aviation, and short-range air defense units; and ensuring the resilience of the command and control system under active enemy kinetic, electronic warfare, and information operations.*

*Based on the analysis of these factors, trends in the forms and methods of combat employment for ground-based air defense units and subunits, and considering the growing role of unmanned aerial vehicles, precision-guided munitions, and ballistic and cruise missiles in the enemy's combined air strikes, four distinct phases in the tactical evolution of ground-based air defense forces during Ukraine's War for Independence are defined. These phases systematically demonstrate the transformation of Ukraine's air and missile defense system toward an adaptive, layered, and network-centric architecture.*

*The study establishes the increasing importance of joint operations pairing ground-based air defense with fighter aviation, mobile fire teams, and unmanned interceptor units within the modern integrated air and missile defense framework.*

*The article may be useful for ground-based air defense experts, military command and control authorities, and researchers studying the development of air and missile defense systems.*

**Keywords:** ground-based air defense forces, ground-based air defense employment tactics, forms and methods of combat employment, ground-based air defense coverage, Integrated Air and Missile Defense, air defense, missile defense.

### References

- [1.] Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine, "Official Telegram Channel." [Online]. Available: <https://t.me/CinCAFU> (in Ukrainian)
- [2.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, "Official Facebook Page." [Online]. Available: <https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua> (in Ukrainian)
- [3.] Air Force of the Armed Forces of Ukraine, "Official Telegram Channel." [Online]. Available: <https://t.me/s/kpszs> (in Ukrainian)
- [4.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, "Official public pages." [Online]. Available: <https://sites.google.com/view/uaairforce> (in Ukrainian)
- [5.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (January 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [6.] V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala, et al., Military-Historical Description of the Russo-Ukrainian War (February 2023): Military Publication. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [7.] M. A. Levchenko et al., Employment of Air Defense Forces and Means of Ukraine in the Russo-Ukrainian War: Experience, Lessons, Recommendations (February 2022 – July 2023): Study Guide. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [8.] B. Zh. Shkurat et al., Employment of Air Defense Forces and Means of Ukraine in the Russo-Ukrainian War: Experience, Lessons, Recommendations (August – December 2023): Study Guide. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [9.] B. Zh. Shkurat et al., Air and Missile Defense Means of the Defense Forces of Ukraine. Foreign Armament: Study Guide, A. H. Saliu, Ed. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [10.] O. V. Hloba, A. H. Saliu, V. H. Patalakha, et al., Employment of the Air Component of the Joint Forces: Study Guide, O. M. Shynkaruk, Ed. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2025. (in Ukrainian)
- [11.] "Losses of the Russian army in Ukraine," Minfin. [Online]. Available: <https://index.minfin.com.ua/ua/russian-involving/casualties> (in Ukrainian)
- [12.] "Ukrainian air defense: Current state and development prospects," Mezha. [Online]. Available: <https://mezha.net/ua/bukvy/ukraine-s-advanced-air-defense-system-evolution-challenges-and-future> (in Ukrainian)
- [13.] "Date and locations of enemy UAV interceptions," UKR Daily Update. [Online]. Available: <https://map.ukrdailyupdate.com> (in Ukrainian)
- [14.] "Ukrainian Pillar for a Modern Air Defence Architecture," SAHA SEC. [Online]. Available: <https://sahasec.org/policy-briefs/ukrainian-pillar-for-a-modern-air-defence-architecture>
- [15.] "Ukraine's Air Defence Evolution from Soviet Legacy to NATO Integration," Lviv Herald. [Online]. Available: <https://www.lvivherald.com/post/ukraine-s-air-defence-evolution-from-soviet-legacy-to-nato-integration>
- [16.] "Ukraine is leveraging its powerful – and cheap – new drone killers for air defense," AP News. [Online]. Available: <https://apnews.com/article/russia-ukraine-war-interceptors-drones-nato-c7b57962e573b344490b07b2cfead856>
- [17.] "Ukraine is using powerful quadcopters to destroy nearly a third of all the Russian air threats it hits, commander says," Business Insider. [Online]. Available: <https://www.businessinsider.com/interceptor-drones-destroy-third-russian-air-threats-shahed-quadcopters-commander-2026-2>

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-63-71**

**УДК 355.40**

**Степанов Григорій Сергійович** (кандидат військових наук, доцент)

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

**Оріховський Павло Володимирович**

<http://orcid.org/0000-0003-4309-154X>

**Наконечний Михайло Миколайович**

<https://orcid.org/0009-0005-2096-2340>

**Янцевич Антон Валерійович**

<https://orcid.org/0009-0001-3767-3001>

*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 14.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 12.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ УДАРНИХ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ ПІД ЧАС ВЕДЕННЯ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ УКРАЇНИ**

*У статті досліджено сукупність зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на ефективність застосування ударних безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України. Обґрунтовано, що в умовах сучасної російсько-української війни ударні безпілотні системи набувають дедалі більшого значення як інструмент ураження засобів повітряного нападу, елементів системи управління, об'єктів базування та іншої критично важливої інфраструктури противника. Проведено аналіз зовнішніх факторів, зокрема воєнно-стратегічних, політичних, географічних, технологічних, економічних, інформаційно-психологічних чинників, а також ролі розвідданих і ситуаційної обізнаності. Окрему увагу приділено внутрішнім факторам, серед яких визначено технічні характеристики ударних безпілотних систем, стійкість до засобів радіоелектронної боротьби, рівень автоматизації, організацію управління, тактику застосування, виробничо-економічні можливості та підготовку персоналу. Встановлено, що ефективність ударних безпілотних систем формується під впливом комплексу взаємопов'язаних умов і значною мірою залежить від здатності системи швидко адаптуватися до змін бойової обстановки, технологічної протидії противника та потреб сучасної війни. Зроблено висновок, що комплексне врахування зазначених факторів створює передумови для підвищення результативності застосування ударних безпілотних систем у системі протиповітряної оборони України.*

***Ключові слова:** ударні безпілотні системи, протиповітряна оборона, ефективність застосування, зовнішні та внутрішні фактори, бойове застосування, російсько-українська війна.*

### **Вступ**

Аналіз воєнно-стратегічної обстановки навколо України свідчить, що збройна агресія російської федерації зберігає тривалий характер, а загрози для держави залишаються системними та багатовимірними [1,2].

Одним із ключових завдань противника є дестабілізація державного і військового управління, а також ураження критично важливих об'єктів інфраструктури та сил оборони. За таких умов роль протиповітряної оборони України істотно зростає, оскільки саме вона забезпечує зниження наслідків повітряних ударів і створює передумови для збереження стійкості оборони держави [2].

Досвід ведення ППО України у ході відсічі повномасштабної агресії РФ проти України засвідчує, що знищення засобів повітряного нападу (далі – ЗПН) противника на аеродромах базування, наземних ракетних комплексів, придушення об'єктів системи управління військами і зброєю є одним із головних завдань сучасної

протиповітряної оборони (далі – ППО) держави, так як знижує бойові спроможності противника щодо нанесення вогневого ураження по об'єктам і військам.

У цьому контексті використання ударних безпілотних систем (далі - УБпС) для знищення засобів повітряного нападу (літаків, гелікоптерів, ракет) безпосередньо в місцях їхнього базування стало стратегічним пріоритетом.

УБпС набули значення як інструмент ураження ЗПН у тактичній, оперативній і стратегічній глибині [2,3].

На початковому етапі повномасштабної війни сторони мали суттєво різні спроможності у сфері ураження засобів повітряного нападу в місцях їх базування. Надалі розвиток ударних безпілотних систем середньої і дальньої дії сприяв частковій зміні цього балансу та розширив набір доступних для України способів вогневого впливу на аеродроми, позиції ракетних засобів та систему управління військами і зброєю [1,5].

Застосування ударних безпілотних систем

дальної дії створило для України додаткову спроможність уражати об'єкти в глибині території противника. Це частково компенсувало дефіцит традиційних засобів ураження відповідного радіуса дії та підвищило значення власного виробництва й технологічної адаптації [5].

Ефективність застосування ударних безпілотних систем у сучасній війні є змінною величиною. Вона залежить від сукупності зовнішніх і внутрішніх чинників: характеру бойових дій, рівня протидії з боку ППО та радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ), організації управління, технічних характеристик УБпС, якості розвіданих і підготовки персоналу [1,4,5].

### **Матеріали та методи**

Досвід застосування ударних безпілотних систем у сучасних збройних конфліктах останніми роками набув значної уваги як у вітчизняній, так і в зарубіжній науковій літературі. У наукових працях [4-6,9-15] досліджуються питання розвитку дроноцентричних операцій, тактико-технічних характеристик ударних безпілотних платформ, особливостей їх бойового застосування, а також способів протидії безпілотним літальним апаратам у межах сучасних систем протиповітряної оборони. Вітчизняні автори значну увагу приділяють узагальненню досвіду російсько-української війни, аналізу тактики застосування FPV-дронів, оцінюванню факторів ефективності безпілотних систем та пошуку шляхів підвищення результативності їх використання в бойових діях [4,5,9-13, 15].

Окремий напрям досліджень становлять праці, присвячені виявленню повітряних цілей, розвитку засобів радіолокаційного спостереження, радіоелектронної розвідки та комплексів протидії малорозмірним безпілотним літальним апаратам [14, 15]. У цих роботах розглядаються як технічні аспекти функціонування радіолокаційних і пасивних систем виявлення, так і питання їх інтеграції в єдині інформаційні контури управління. Зарубіжні дослідження доповнюють зазначені підходи аналізом сучасних технологій C-UAS, методів виявлення, супроводження та ідентифікації безпілотних систем, а також оцінкою ролі штучного інтелекту, комп'ютерного зору й автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у протидії повітряним загрозам [1,8].

Водночас аналіз використаних джерел свідчить, що наявні публікації переважно зосереджені або на технічних характеристиках окремих засобів, або на тактичних аспектах застосування безпілотних систем і боротьби з ними [4-6,9-15]. Меншою мірою дослідженням залишається комплексний підхід до оцінювання саме зовнішніх і внутрішніх факторів, які в сукупності визначають ефективність застосування ударних безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України. Недостатньо уваги приділено також взаємозв'язку між технологічною адаптивністю платформ, рівнем протидії з боку ППО і РЕБ противника, якістю розвідувального забезпечення, організацією управління та ресурсною стійкістю системи. Саме

це зумовлює актуальність теми статті та визначає потребу в подальшому науковому узагальненні зазначеної проблематики.

Метою статті є узагальнення та систематизація основних зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на ефективність застосування ударних безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України. Дослідження має аналітико-оглядовий характер і спрямоване на виявлення факторів, які найбільшою мірою визначають результативність застосування УБпС.

### **Результати**

Аналіз зовнішніх факторів, що впливають на ефективність застосування безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України.

Ефективність застосування УБпС для ураження цілей, пов'язаних із повітряним нападом противника, залежить від комплексу зовнішніх умов. Частина з них може створювати сприятливі передумови для застосування систем, тоді як інші істотно знижують імовірність успішного виконання завдання. У межах цієї статті зовнішні фактори доцільно поділяти на змінні та відносно постійні [3,4].

Зовнішні змінні фактори, що впливають на ефективність застосування безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України, формуються у зовнішньому середовищі, безпосередньо не контролюються українською стороною, але суттєво впливають на планування, координацію та результативність застосування [3,4].

1. Воєнно-стратегічні фактори визначають місце безпілотних систем у загальній системі ППО України та впливають на вибір способів їх застосування. У сучасній війні до найбільш значущих належать такі фактори:

1.1. Характер війни та інтенсивність бойових дій. Для російсько-української війни характерні велика протяжність театру бойових дій, значна віддаленість окремих важливих об'єктів противника та висока динаміка зміни обстановки. Це зумовлює потребу як у системах тактичного рівня, так і в ударних системах більшої дальності.

Вплив характеру війни та інтенсивності бойових дій на ефективність застосування УБпС можна узагальнити так:

в умовах високої щільності бойових дій і протидії з боку ППО зростає значення відносно дешевих, серійних і швидко відновлюваних рішень, здатних забезпечувати масоване або повторюване застосування;

скорочення часу між виявленням цілі та її ураженням підвищує вимоги до швидкості прийняття рішень, стійкості каналів зв'язку та інтеграції розвідки з вогневими засобами.

Отже, в умовах війни високої інтенсивності ефективність УБпС визначається не лише індивідуальними характеристиками окремого виробу, а й здатністю системи забезпечувати масовість, адаптивність та швидке оновлення рішень відповідно до змін обстановки.

1.2. Система ППО противника. Наявність ешелонованої протиповітряної оборони істотно ускладнює застосування безпілотних систем, особливо під час ураження цілей, прикритих засобами великої, середньої та малої дальності.

Вплив ешелонованої оборони на ефективність застосування УБпС проявляється в такому:

чим вища щільність і узгодженість роботи ворожої ППО, тим нижча імовірність прориву окремої платформи до цілі та тим більшої ваги набувають маршрутна підготовка, масування та хибні цілі;

наявність спеціалізованих засобів боротьби з малорозмірними цілями зменшує ефективність повільних і передбачуваних платформ, що потребує постійного вдосконалення профілю польоту, навігації та тактики застосування.

Як наслідок, застосування УБпС потребує використання маловисотних профілів польоту, гнучкого планування маршрутів, а також поєднання масованості, раптовості та економічно доцільних платформ [7].

Таким чином, розвинена ППО противника не унеможливує застосування УБпС, але змінює характер їх використання, підвищуючи роль комплексного планування та адаптації тактики до конкретної оборонної конфігурації.

1.3. Насиченість РЕБ. Висока насиченість засобами радіоелектронної боротьби є одним із ключових викликів для ударних безпілотних систем, оскільки безпосередньо впливає на стійкість управління, навігацію та наведення на ціль [4, 10, 11, 13].

Активне застосування противником засобів придушення супутникової навігації та каналів управління знижує ефективність класичних схем дистанційного керування. У відповідь зростає значення автономних режимів польоту, інерціальної навігації, оптичної корекції та алгоритмів донаведення на кінцевій ділянці маршруту.

Отже, стійкість до РЕБ дедалі більше визначається не лише технічними параметрами самої платформи, а й здатністю підрозділів оперативно змінювати частотні рішення, оновлювати програмне забезпечення та застосовувати альтернативні алгоритми наведення.

2. Політичні фактори значною мірою визначають масштаб, інтенсивність та допустимі межі застосування УБпС. У цьому випадку йдеться не лише про військову доцільність, а й про необхідність збереження міжнародної підтримки, дотримання правових норм та врахування ризиків ескалації [3,8].

2.1. Міжнародно-правові обмеження. Застосування дронів має відповідати нормам міжнародного гуманітарного права, зокрема принципам розрізнення, пропорційності та вжиття запобіжних заходів для мінімізації шкоди цивільному населенню. Ці вимоги безпосередньо впливають на вибір цілей, способи застосування та процедури підтвердження результатів удару.

2.2. Міжнародна підтримка та санкційний тиск. Зовнішня військово-технічна, фінансова й організаційна підтримка впливає на темпи розгортання виробництва, модернізацію безпілотних платформ і забезпечення суміжних спроможностей. Водночас санкційний тиск на противника може опосередковано впливати на його здатність відновлювати втрати, адаптувати технології та забезпечувати виробництво [8].

У практичному вимірі міжнародна підтримка підвищує стійкість національного оборонно-промислового комплексу, сприяє розвитку серійного виробництва та розширює доступ до технологій і компонентів, необхідних для створення сучасних безпілотних систем.

2.3. Рівень ескалації конфлікту. Із зростанням інтенсивності бойових дій та ескалації змінюється роль УБпС: від допоміжного засобу вогневого впливу до інструменту системного ураження та виснаження противника [3,7,8].

Еволюцію цілей при підвищенні ескалації можна подати так:

за нижчої інтенсивності УБпС частіше використовуються для вибіркового ураження окремих об'єктів або техніки, де критичними є раптовість і точність;

за вищої інтенсивності бойових дій безпілотні системи дедалі частіше розглядаються як один із масових засобів ураження, ефективність яких визначається можливістю масштабування, ритмічністю виробництва та здатністю підтримувати тривале застосування.

Крім того, за умов ескалації розширюється перелік потенційних цілей у тилу противника, а застосування УБпС набуває додаткового воєнно-політичного значення як інструмент підвищення вартості агресії для противника.

Це свідчить про те, що системи дальньої дії можуть впливати на загальну конфігурацію повітряної загрози та, опосередковано, на умови функціонування ППО України.

3. Географічні та природні фактори істотно впливають на планування маршрутів, режим польоту, точність ураження та ймовірність прихованого проходження безпілотних платформ [4,4].

3.1. Рельєф місцевості. Характер місцевості визначає можливості маловисотного польоту, використання складних маршрутів і прихованого наближення до цілі. У відкритій місцевості зростають вимоги до профілю польоту, тоді як пересічена або урбанізована місцевість одночасно створює і додаткові можливості маскування, і додаткові обмеження щодо зв'язку, навігації та правомірності застосування [4,4, 14].

Ліси, балки, забудова та інші елементи рельєфу можуть ускладнювати виявлення УБпС, але водночас впливають на стабільність зв'язку, точність навігації та якість візуального спостереження.

3.2. Кліматичні умови, пора року та доби. Погодні умови безпосередньо впливають на роботу оптико-електронних засобів, силових установок,

акумуляторів, а також на стійкість польоту та точність наведення [4,6].

Опади, туман, низька хмарність, обмерзання, різкі пориви вітру та сезонні температурні коливання можуть як зменшувати ефективність окремих типів платформ, так і змінювати доцільний час їх застосування. У зв'язку з цим погодний фактор має враховуватися під час вибору маршруту, бойового навантаження та способу наведення.

4. Технологічні фактори визначають можливості проникнення в систему ППО противника, точність ураження та загальну результативність застосування ударних безпілотних систем. У сучасній війні саме технологічна адаптивність часто стає однією з ключових передумов успіху [1,4,8].

4.1. Супутникова інфраструктура. Наявність супутникових сервісів і навігаційних систем суттєво впливає на радіус дії, точність маршрутизації, якість передачі даних і сталість функціонування безпілотних платформ на значній відстані від пункту управління [8].

Супутникові рішення розширюють можливості застосування безпілотних систем поза межами прямої радіовидимості та можуть підвищувати стійкість до частини наземних засобів радіоелектронної протидії. Водночас вони також залишаються вразливими до спуфінгу, джамінгу та інших способів впливу.

Важливим є й те, що низька затримка та стабільний обмін даними створюють умови для оперативної обробки інформації, уточнення обстановки та використання алгоритмів автоматизованої підтримки прийняття рішень.

Отже, супутникова інфраструктура є одним із базових елементів, що визначають навігаційну точність і функціональну дальність застосування сучасних УБпС [3].

4.2. Рівень розвитку ППО та ПРО у регіоні. Ступінь розвиненості засобів протиповітряної та протиракетної оборони визначає рівень ризику для безпілотних платформ, допустимі сценарії їх застосування та економічну доцільність окремих операцій [3, 5, 12].

За слабшої оборони ударні БпС можуть демонструвати високу ефективність як відносно дешевий засіб ураження. За наявності багаторівневої ППО результативність дедалі більше залежить від масованості, прихованості, якості маршрутно-ї підготовки, технологічної складності та поєднання з іншими засобами ураження.

Таким чином, розвиток ППО і ПРО формує не лише оборонний потенціал противника, а й межі доцільного застосування конкретних типів безпілотних систем.

4.3. Кіберзагрози. Для безпілотних систем кіберзагрози мають безпосереднє значення, оскільки можуть впливати на управління платформою, цілісність даних, безпечність програмного забезпечення та захищеність наземної інфраструктури [3,8].

Основні напрями кібервпливу на ефективність застосування можуть бути такими:

перехоплення або спотворення управління через вразливості каналів передачі даних, що може призвести до втрати контролю над платформою або зриву місії;

компрометація ланцюга постачання, оновлень програмного забезпечення чи окремих компонентів, що створює ризик вбудованих обмежень, прихованих механізмів збору даних або інших небезпечних наслідків;

ураження наземних станцій керування, терміналів та допоміжних інформаційних систем, через які може відбуватися витік телеметрії, журналів польоту, відеоданих чи координат;

маніпуляція навігаційними або сенсорними даними, що здатна спричинити відхилення від маршруту, неправильну ідентифікацію об'єкта або порушення процесу наведення.

Отже, кіберстійкість є важливою складовою загальної ефективності УБпС і має розглядатися поряд із технічними, тактичними та організаційними характеристиками системи.

5. Економічні фактори визначають можливості виробництва УБпС, масштаби їх застосування та ресурсну стійкість відповідних програм. Основними аспектами економічного впливу є такі: [4,7]

5.1 Вартість застосування. У сучасній війні ефективність ударної системи оцінюється не лише за технічними параметрами, а й за співвідношенням вартості місії, вартості ураженого об'єкта та можливості повторного застосування відповідного рішення.

Економічний зміст цього фактору можна подати так:

надмірно висока вартість окремого засобу ураження обмежує можливість його системного використання в умовах тривалого конфлікту;

економічна асиметрія може створювати перевагу стороні, яка застосовує відносно дешевші платформи проти дорожчих цілей або змушує противника витратити значний ресурс на перехоплення;

масовість і доступність серійних платформ підвищують гнучкість застосування та дають змогу підтримувати високу інтенсивність ударів там, де використання дорожчих засобів є недоцільним;

структура витрат охоплює не лише ціну платформи, а й витрати на боеприпас, логістику, технічне обслуговування, навчання персоналу та відновлення спроможностей.

У зв'язку з цим ефективною слід вважати не просто дешеву систему, а таку, яка забезпечує досягнення поставленого результату з прийнятними ресурсними витратами та можливістю масштабування.

Отже, економічний фактор прямо впливає на тактику застосування, ритм операцій і загальну стійкість використання УБпС у війні на виснаження.

5.2 Виробничі спроможності. Реальна бойова ефективність безпілотних систем безпосередньо

пов'язана зі здатністю держави та промисловості забезпечувати серійне виготовлення, швидке оновлення конструкцій і стабільне постачання компонентів [2,3,7].

Аспектами виробничої спроможності є:

масштабованість виробництва, яка дає змогу підтримувати потрібну інтенсивність застосування та формувати достатній резерв для компенсації бойових втрат;

гнучкість і швидкість ітерацій, що дозволяють своєчасно змінювати конструкцію, програмне забезпечення, канали зв'язку та інші елементи відповідно до нових форм протидії;

локалізація виробництва та зменшення залежності від імпорتنих компонентів, що підвищує стійкість постачання і скорочує час реагування на потреби фронту;

спроможність виготовляти або адаптувати бойові частини та суміжні елементи комплексу, що безпосередньо впливає на надійність і практичну результативність застосування.

Таким чином, виробничі спроможності визначають не лише кількість доступних платформ, а й швидкість технологічної адаптації, без якої навіть перспективні зразки швидко втрачають актуальність.

6. Інформаційно-психологічний вплив може виступати додатковим чинником ефективності застосування УБпС. Його значення полягає у впливі на поведінку особового складу, інформаційне середовище та сприйняття безпекової ситуації [5,7,15].

6.1. Ефект постійного спостереження та деморалізація. Наявність безпілотних платформ у повітрі змінює поведінку противника, змушує його обмежувати переміщення, маскуватися, розосереджувати сили та витратити додаткові ресурси на захист і спостереження.

6.2. Поширення відеоматеріалів об'єктивного контролю. Публікація підтверджених результатів ударів може впливати на інформаційний фон, внутрішню мобілізацію ресурсів і сприйняття ефективності безпілотних систем як у власному суспільстві, так і у противника.

6.3. Формування образу певних систем як символів війни. Окремі платформи або типи дронів можуть набувати значного медійного значення, що підсилює їх політичний та психологічний ефект незалежно від конкретних тактичних результатів окремої місії.

6.4. Інформаційні операції та відволікальні дії. Імітація активності, дезінформація, хибні сигнали та інші інформаційні прийоми здатні впливати на рішення противника, навантажувати його системи реагування та створювати сприятливі умови для реальних ударів.

Отже, інформаційно-психологічний компонент не замінює власне бойовий результат, однак може підсилювати загальний ефект від застосування безпілотних систем і впливати на поведінку противника.

7. Розвіддані та ситуаційна обізнаність. Актуальна розвідувальна інформація і належна

ситуаційна обізнаність є необхідною передумовою результативного застосування УБпС, оскільки визначають якість цілевказання, вибір маршруту та своєчасність ураження [1,2,9].

7.1. Скорочення циклу «виявлення — ураження». Ефективність ударних систем прямо залежить від швидкості надходження та обробки розвідданих. Чим менший проміжок часу між виявленням об'єкта і нанесенням удару, тим вища ймовірність ураження цілі до зміни нею положення або режиму функціонування.

7.2. Оптимізація вибору цілей. Належна ситуаційна обізнаність дає змогу раціонально розподіляти ударні засоби, зосереджуючи їх на об'єктах, ураження яких забезпечує найбільший оперативний або тактичний ефект.

7.3. Навігація та подолання протидії. Дані про розташування засобів ППО, районів активності РЕБ, особливості рельєфу та зміни обстановки дозволяють обирати більш безпечні маршрути польоту й підвищують ймовірність виконання завдання.

7.4. Оцінка результатів удару. Підтвердження факту ураження або збереження цілі дозволяє коригувати подальші дії, уникати повторного витрачання ресурсу на вже уражені об'єкти та швидше приймати рішення щодо повторної атаки чи зміни пріоритетів.

Таким чином, розвіддані та ситуаційна обізнаність визначають якість підготовки й супроводу бойового застосування УБпС та істотно впливають на загальну результативність удару.

Зовнішні відносно постійні фактори, що впливають на ефективність застосування безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України, не зазнають суттєвих змін у коротко- та середньостроковій перспективі та формують базовий контекст їх використання: [6, 8]

1. геополітичне положення України між російською федерацією та державами НАТО створює сталий безпековий контекст, у межах якого система ППО орієнтована на східний і південний напрями та водночас враховує потребу сумісності з партнерами;

2. фізичні параметри повітряного простору, відстані до потенційно важливих об'єктів і географія зон ризику безпосередньо впливають на час реагування, конфігурацію чергування та вимоги до координації засобів;

3. технологічна залежність від зовнішніх ринків, окремих компонентів і глобальних ланцюгів постачання залишається важливим обмежувальним чинником для розвитку та модернізації безпілотних систем;

4. фізичні закони поширення радіохвиль, дальність виявлення, особливості навігації та інші сталі технічні умови формують об'єктивні межі застосування платформ і не можуть бути змінені організаційними рішеннями;

5. наявність супутникових і глобальних інформаційних систем, що перебувають поза прямим контролем України, є сталою умовою, яку

необхідно враховувати під час планування й застосування УБпС [6].

Отже, зазначені зовнішні відносно постійні фактори визначають рамкові можливості та обмеження застосування безпілотних систем під час ведення ППО України, незалежно від поточних тактичних змін обстановки.

Таким чином, в умовах України ефективність ударних безпілотних систем визначається поєднанням зовнішньої протидії, технологічної стійкості, якості управління, доступу до ресурсів та здатності системи швидко адаптуватися до змін у середовищі застосування.

Аналіз внутрішніх факторів, що впливають на ефективність застосування безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України.

Аналіз внутрішніх, тобто керованих, факторів базується на оцінюванні тих характеристик системи, на які Україна може безпосередньо впливати як розробник, виробник, організатор застосування та експлуатант безпілотних платформ [7, 8].

До основних внутрішніх факторів доцільно віднести технічний, організаційно-управлінський, тактичний, економічний і кадровий домени.

У межах цієї статті внутрішні фактори розглядаються як сукупність параметрів, від яких залежить спроможність системи забезпечувати сталі та результативні застосування безпілотних платформ у складі ППО.

#### 1. Технологічні характеристики та інновації.

Стійкість до РЕБ і навігація. Ефективність ударних БпЛА значною мірою залежить від захищеності каналів управління, наявності резервних рішень для навігації та здатності платформи зберігати функціональність в умовах придушення супутникових сигналів [4,10,11,13].

Автоматизація та елементи ШІ. Використання алгоритмів автоматизованого супроводу, донаведення та обробки даних може знижувати залежність від безперервного ручного управління на окремих етапах місії та підвищувати стійкість до втрати зв'язку.

Масштабованість і серійність. Перехід від поодиноких зразків до серійного виробництва створює передумови для системного застосування, накопичення досвіду та стандартизації рішень.

Інноваційність та адаптивність. Постійне оновлення технічних характеристик, програмного забезпечення й архітектури комплексів є відповіддю на зміну тактики противника та його засобів протидії.

Інтеграція в системи ситуаційної обізнаності. Ефективність зростає тоді, коли дані від БпС включаються до єдиного інформаційного контуру управління та використовуються для оперативного прийняття рішень.

#### 2. Організаційно-управлінські фактори.

Інституційне оформлення та спеціалізація підрозділів безпілотних систем створюють умови для підвищення керованості, розподілу відповідальності та накопичення профільної експертизи [2,3].

Управління та децентралізація. Ефективність застосування безпілотних систем значною мірою залежить від швидкості прийняття рішень, гнучкості організаційних процедур і здатності командирів адаптувати використання сил до конкретного типу загрози [3,4].

Підготовка персоналу. Рівень підготовки операторів, інженерів, планувальників і командирів визначає якість застосування комплексів в умовах інтенсивної протидії.

Системи аналізу After Action Review. Регулярний збір і аналіз інформації про польоти, втрати, успішність ураження та причини збоїв дозволяє оперативно коригувати тактику, технічні рішення й навчальні програми.

Інтеграція в єдиний інформаційний простір. Узгоджена робота безпілотних систем із розвідкою, засобами РЕБ, ППО та іншими компонентами оборони підвищує ефективність застосування та зменшує ризик неузгоджених дій.

Підготовка та спеціалізація операторів. Професійний рівень персоналу безпосередньо впливає на ймовірність успішного виконання місії, стійкість до стресу та якість дій у нестандартних умовах.

#### 3. Тактичні фактори застосування.

Еволюція тактики. У сучасних умовах УБпС дедалі частіше розглядаються не як допоміжний, а як повноцінний елемент системи вогневого впливу, здатний доповнювати інші засоби ППО й ураження [5,10,11,13].

Поєднання засобів. Найвища результативність досягається за умови комбінованого використання авіації, зенітних комплексів, засобів РЕБ, розвідки та безпілотних систем відповідно до конкретної обстановки.

Логістика та забезпечення. Безперервне постачання платформ, комплектуючих, боєприпасів, засобів зв'язку та енергоживлення є необхідною умовою стійкого застосування безпілотних систем у тривалому режимі.

#### 4. Економічні фактори.

Вартість знищення. Внутрішнім фактором успіху є досягнення прийняттого співвідношення між ресурсами, витраченими на місію, і військовим ефектом від ураження цілі [4,7].

Ключовим є те, що застосування ударних БпЛА може частково зменшувати навантаження на дефіцитні засоби ураження за умови належної організації виробництва, підготовки та бойового застосування.

#### 5. Людський фактор.

Людський фактор є одним із визначальних для ефективності застосування УБпС, оскільки помилки персоналу, недостатня підготовка, перевтома або втрата ситуаційної обізнаності безпосередньо впливають на результат місії, збереження платформи та безпеку застосування [2,4].

Основними аспектами впливу людського фактору є:

підготовка та спеціалізація операторів, від яких залежать правильність використання техніки,

швидкість прийняття рішень і здатність діяти в умовах перешкод та невизначеності;

психофізіологічний стан, зокрема втома, стрес, зниження концентрації та когнітивне перевантаження, що можуть спричинити помилки під час планування й виконання місії;

ситуаційна обізнаність, втрата якої підвищує ризик входження в небезпечні райони, помилок у маршрутизації та неадекватної оцінки загрози;

швидкість адаптації до протидії, оскільки сучасне бойове середовище вимагає від операторів і командирів постійного навчання та швидкого оновлення практик застосування.

Для мінімізації негативного впливу людського фактору необхідні якісна підготовка, стандартизація процедур, автоматизація окремих процесів та належна організація режиму праці й відпочинку персоналу.

### **Обговорення**

Результати проведеного аналізу свідчать, що ефективність застосування ударних безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України не може визначитися лише сукупністю їх тактико-технічних характеристик. На відміну від спрощених підходів, за яких результативність УБпС пов'язується переважно з дальністю польоту, точністю наведення чи стійкістю до засобів радіоелектронної боротьби, у сучасних умовах вирішальне значення має взаємодія зовнішніх і внутрішніх факторів. Саме поєднання характеру бойових дій, рівня протидії противника, якості розвідданих, організації управління, підготовки персоналу та ресурсної спроможності виробництва формує реальний бойовий потенціал безпілотних систем [1,4,5].

Проведене дослідження підтверджує, що в умовах російсько-української війни ударні безпілотні системи набувають значення не лише як окремі засіб ураження, а як складова ширшої системи вогневого та інформаційного впливу. Їхня ефективність дедалі більше залежить від здатності інтегруватися в єдиний контур ситуаційної обізнаності, взаємодіяти з розвідувальними, зенітними, радіоелектронними та командно-управлінськими компонентами. Це дозволяє розглядати БпС не ізольовано, а як елемент адаптивної системи, що функціонує в умовах постійної зміни загроз, технологічного суперництва та високої динаміки бойової обстановки.

Окремої уваги заслуговує те, що зовнішні фактори впливу мають неоднорідний характер. Частина з них є змінними та безпосередньо відображає поточну обстановку, зокрема інтенсивність бойових дій, насиченість ППО і РЕБ противника, доступність міжнародної підтримки, якість розвідданих та погодні умови. Інша частина має відносно сталій характер і формує базові рамки застосування безпілотних систем. Це означає, що ефективність УБпС повинна оцінюватися не як фіксована характеристика певної платформи, а як змінна категорія, що залежить від конкретної

оперативної ситуації та здатності системи реагувати на її зміни.

Водночас аналіз внутрішніх факторів показує, що саме вони є найбільш керованими з боку України, а отже, створюють основний простір для практичного підвищення ефективності застосування ударних безпілотних систем. Насамперед це стосується темпів технологічної адаптації, серійності виробництва, стандартизації процедур, організації підготовки персоналу, удосконалення тактики та забезпечення належного рівня міжвидової взаємодії. У цьому контексті можна стверджувати, що перевага в сучасній війні досягається не лише шляхом створення окремих ефективних платформ, а насамперед за рахунок формування стійкої системи швидкого оновлення рішень, масштабування виробництва та оперативного впровадження бойового досвіду.

Отримані результати узгоджуються з сучасними підходами до розуміння ролі безпілотних систем у війні високої інтенсивності, де визначальними стають не окремі технічні переваги, а комплексність застосування, гнучкість управління та здатність до тривалого функціонування в умовах виснаження. Водночас проведене дослідження має переважно аналітико-оглядовий характер, що певною мірою обмежує можливість кількісного вимірювання ваги кожного окремого фактору. Це відкриває перспективи для подальших досліджень, спрямованих на розроблення моделей оцінювання впливу різних чинників на результативність застосування УБпС, а також на формування критеріїв пріоритетності їх удосконалення в системі протиповітряної оборони України.

Перспективи подальших досліджень.

Перспективи подальших досліджень полягають у поглибленні наукового аналізу факторів, що впливають на ефективність застосування ударних безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України, насамперед у напрямі їх кількісного оцінювання та ранжування за ступенем впливу на результативність бойового застосування. Актуальним є розроблення моделей і методик, які дозволять визначати вагомість окремих зовнішніх і внутрішніх чинників залежно від характеру бойової обстановки, рівня протидії з боку противника, умов застосування та типу безпілотної платформи.

Подальших досліджень потребують питання інтеграції ударних безпілотних систем у єдиний інформаційно-управлінський контур протиповітряної оборони, удосконалення їх взаємодії із засобами розвідки, радіоелектронної боротьби, зенітними системами та іншими компонентами сил оборони. Окрему увагу доцільно приділити вивченню впливу технологічної адаптивності платформ, розвитку автономних режимів управління, застосування елементів штучного інтелекту, а також виробничо-економічної стійкості на загальну ефективність безпілотних систем у війні високої інтенсивності.

Перспективним напрямом є також розроблення практичних рекомендацій щодо вдосконалення

тактики застосування ударних безпілотних систем в умовах активної протидії ППО та РЕБ противника, а також формування підходів до підготовки персоналу, стандартизації процедур і впровадження результатів бойового досвіду в систему планування та управління. Це сприятиме не лише подальшому розвитку теоретичних положень, а й підвищенню практичної результативності застосування ударних безпілотних систем у системі протиповітряної оборони України.

### **Висновки**

У статті проведено комплексний аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на ефективність застосування ударних безпілотних систем під час ведення протиповітряної оборони України. Встановлено, що результативність їх бойового застосування визначається не окремими тактико-технічними характеристиками платформ, а сукупністю взаємопов'язаних умов, які охоплюють воєнно-стратегічну обстановку, рівень протидії з боку противника, технологічну стійкість систем, якість розвідувального забезпечення, організацію управління, ресурсні можливості та підготовку персоналу. Доведено, що в умовах сучасної війни ударні безпілотні системи виступають не лише засобом ураження окремих цілей, а й важливим елементом загальної системи вогневого, інформаційного та психологічного впливу на противника.

Результати дослідження дають підстави стверджувати, що підвищення ефективності застосування ударних безпілотних систем у системі протиповітряної оборони України можливе лише за умови комплексного врахування впливу зовнішніх і внутрішніх чинників, їх своєчасного оцінювання та адаптації до змін бойової обстановки. Визначальне значення при цьому мають стійкість до засобів радіоелектронної боротьби, інтеграція в єдиний інформаційно-управлінський контур, розвиток серійного виробництва, удосконалення тактики застосування та належний рівень професійної підготовки персоналу. Саме системний підхід до розвитку, організації та бойового використання ударних безпілотних систем створює передумови для підвищення результативності протиповітряної оборони України та зміцнення спроможностей держави у протидії сучасним повітряним загрозам.

### **Список використаних джерел**

- [1.] J. Bronk, N. Reynolds та J. Watling, *The Russian Air War and Ukrainian Air Defence*. London, U.K.: Royal United Services Institute, 2023.
- [2.] Сили безпілотних систем, Звіт із вивчення досвіду застосування рот ударних БпАК. Україна: Сили безпілотних систем, 2024.
- [3.] Головнокомандувач ЗС України, Доктрина "Застосування безпілотних систем у силах оборони України", затв. Головнокомандувачем Збройних Сил України 01.01.2024 (№ 49/НВГШ від 02.01.2024). Київ, Україна: ГШ ЗСУ, 2024.
- [4.] А. Мельниченко, "Аналіз та оцінювання факторів, які впливають на ефективність застосування безпілотних систем в операціях (бойових діях)," *The Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine Military Science*, т. 3, № 2, с. 210–225, 2025.
- [5.] Г. С. Степанов, П. В. Оріховський, С. В. Гашенко та А. М. Луцишин, "Розвиток дроноцентричних операцій за досвідом збройних конфліктів та російсько-української війни," *Повітряна міць*, № 2(5), с. 13–16, 2023.
- [6.] С. П. Мосов, М. В. Погорецький, С. М. Салій, О. В. Сєлюков та ін., *Безпілотна авіація у військовій справі: кол. монографія*. Київ, Україна: Інтерсервіс, 2019.
- [7.] Сили безпілотних систем, *Deep Strike БпЛА. Зброя для перенесення війни на територію росії*. Україна: Сили безпілотних систем, 2024.
- [8.] International Institute for Strategic Studies, *The Military Balance 2024*. London, U.K.: IISS, 2024.
- [9.] Ю. Є. Репіло та О. М. Іщенко, "Модель застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах виконання вогневих завдань артилерією в збройних конфліктах," *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 3(45), с. 83–90, 2022.
- [10.] Г. В. Худов, І. А. Хижняк, І. Ю. Грідасов та ін., "Аналіз тактико-технічних характеристик та тактики застосування існуючих ударних FPV-дронів," *Системи управління, навігації та зв'язку*, № 1(3), с. 45–54, 2024.
- [11.] О. О. Олексенко, О. М. Гук, В. В. Сніцаренко та ін., "Щодо особливостей бойового застосування FPV-дронів у російсько-українській війні," *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 4(22), с. 20–29, 2024.
- [12.] А.К. Павліковський, В.О. Тютюнник, В.А. Ткаченко та Н.І. Ткаченко, "Підвищення ефективності протидії масованому застосуванню ударних безпілотних літальних апаратів," *Наука і оборона*, № 1(2025), с. 45–57, 2024.
- [13.] М. В. Семенов та В. В. Масіц, "Еволюція тактики застосування FPV-дронів у російсько-українській війні: від радіокерування до оптоволокна," *Національні інтереси України*, № 11(16), с. 477–484, 2025.
- [14.] А. С. Дудуш, В. О. Тютюнник, О. А. Резніченко та С. Ю. Гогоняц, "Сучасний стан та проблеми протидії маловисотним, низькошвидкісним та малорозмірним БПЛА," *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 1(31), с. 121–131, 2018.
- [15.] С. П. Мосов та С. М. Салій, "Захист від дронів та протидія їхньому застосуванню на полі бою (російсько-український воєнний конфлікт)," *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України*, № 2(85), с. 81–87, 2025.

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

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

**Pavlo Orikhovskiy**

<http://orcid.org/0000-0003-4309-154X>

**Mykhailo Nakonechnyi**

<https://orcid.org/0009-0005-2096-2340>

**Anton Yantsevych**

<https://orcid.org/0009-0001-3767-3001>

*National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE EFFECTIVENESS OF EMPLOYING STRIKE UNMANNED SYSTEMS IN THE COURSE OF UKRAINE'S AIR DEFENSE OPERATIONS

*The article analyzes the set of external and internal factors influencing the effectiveness of employing strike unmanned systems in the course of Ukraine's air defense operations. It is substantiated that, under the conditions of the ongoing Russian-Ukrainian war, strike unmanned systems are acquiring increasing importance as an instrument for engaging enemy air attack assets, command and control elements, deployment sites, and other critical infrastructure targets. The study examines the main external factors affecting the effectiveness of their employment, including military-strategic, political, geographical, technological, economic, and informational-psychological factors, as well as the role of intelligence support and situational awareness. Particular attention is paid to internal factors, such as the technical characteristics of platforms, resilience to electronic warfare, the level of automation, command and control organization, employment tactics, production and economic capacity, and personnel training. It has been established that the effectiveness of strike unmanned systems is determined by a set of interrelated conditions and largely depends on the ability of the system to adapt rapidly to changes in the operational environment, enemy technological countermeasures, and the requirements of modern warfare. The study concludes that comprehensive consideration of these factors creates the necessary preconditions for improving the effectiveness of strike unmanned systems within Ukraine's air defense system.*

**Keywords:** *strike unmanned systems, air defense, effectiveness factors, electronic warfare, situational awareness, combat employment, Russian-Ukrainian war.*

### References

- [1.] J. Bronk, N. Reynolds, and J. Watling, *The Russian Air War and Ukrainian Air Defence*. London, U.K.: Royal United Services Institute, 2023.
- [2.] Unmanned Systems Forces, *Report on Studying the Experience of Employing Strike UAV Companies*. Kyiv, Ukraine: Unmanned Systems Forces, 2024. (in Ukrainian)
- [3.] Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine, *Doctrine "Employment of Unmanned Systems in the Defense Forces of Ukraine"*, approved Jan. 1, 2024 (Order No. 49/NVHSh dated Jan. 2, 2024). Kyiv, Ukraine: Armed Forces of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [4.] A. Melnychenko, "Analysis and assessment of factors affecting the effectiveness of the employment of unmanned systems in operations (combat actions)," *The Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine Military Science*, vol. 3, no. 2, pp. 210–225, 2025. (in Ukrainian)
- [5.] H. S. Stepanov, P. V. Orikhovskiy, S. V. Hashenko, and A. M. Lutsyshyn, "Development of drone-centric operations based on the experience of armed conflicts and the Russian-Ukrainian war," *Air Power of Ukraine*, no. 2(5), pp. 13–16, 2023. (in Ukrainian)
- [6.] S. P. Mosov, M. V. Pohoretskyi, S. M. Saliy, O. V. Sieliukov, et al., *Unmanned Aviation in Military Affairs: Collective Monograph*. Kyiv, Ukraine: Interservis, 2019. (in Ukrainian)
- [7.] Unmanned Systems Forces, *Deep Strike UAV. A Weapon to Transfer the War to the Territory of Russia*. Kyiv, Ukraine: Unmanned Systems Forces, 2024. (in Ukrainian)
- [8.] International Institute for Strategic Studies, *The Military Balance 2024*. London, U.K.: IISS, 2024.
- [9.] Yu. Ye. Repilo and O. M. Ischenko, "Model of employing unmanned aerial systems in the interests of performing fire missions by artillery in armed conflicts," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 3(45), pp. 83–90, 2022. (in Ukrainian)
- [10.] H. V. Khudov, I. A. Khyzhniak, I. Yu. Hridasov, et al., "Analysis of tactical and technical characteristics and tactics of employment of existing strike FPV drones," *Systems of Control, Navigation and Communication*, no. 1(3), pp. 45–54, 2024. (in Ukrainian)
- [11.] O. O. Oleksenko, O. M. Huk, V. V. Snitsarenko, et al., "Regarding the features of combat employment of FPV drones in the Russian-Ukrainian war," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 4(22), pp. 20–29, 2024. (in Ukrainian)
- [12.] A. K. Pavlikovskiy, V. O. Tiutiunyk, V. A. Tkachenko, and N. I. Tkachenko, "Increasing the effectiveness of countering the massive employment of strike unmanned aerial vehicles," *Science and Defense*, no. 1(2025), pp. 45–57, 2024. (in Ukrainian)
- [13.] M. V. Semenov and V. V. Masits, "Evolution of FPV drone employment tactics in the Russian-Ukrainian war: From radio control to fiber optics," *National Interests of Ukraine*, no. 11(16), pp. 477–484, 2025. (in Ukrainian)
- [14.] A. S. Dudush, V. O. Tiutiunyk, O. A. Reznichenko, and S. Yu. Hohoniants, "Current state and problems of countering low-altitude, low-speed and small-sized UAVs," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 1(31), pp. 121–131, 2018. (in Ukrainian)
- [15.] S. P. Mosov and S. M. Saliy, "Protection against drones and countering their employment on the battlefield (Russian-Ukrainian military conflict)," *Collection of Scientific Works of the Center for Military Strategic Studies of the National Defense University of Ukraine*, no. 2(85), pp. 81–87, 2025. (in Ukrainian)

# МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЙ ТА БОЙОВИХ ДІЙ У ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРИ

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-72-81**

**УДК 621.396.96**

**Dmytro Zavadsky**

**<https://orcid.org/0000-0003-2728-136X>**

**Oleh Biloborodov** (Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher)

**<https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>**

*Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine*

*Received: November 21, 2025; Accepted: May 16, 2026; Published: June 17, 2026.*

## RESEARCH ON THE CHARACTERISTICS OF RADAR DETECTABILITY OF RUSSIAN AIR ATTACK WEAPONS USING 3D MODELLING TECHNOLOGIES

*The article presents scientific and methodological approaches and research results on the characteristics of radar visibility of modern enemy air attack weapons using numerical modelling methods. To conduct the software experiment, a software and hardware complex for modelling high-frequency aspects of the functioning of weapons and military equipment samples based on Ansys Academic Research HF is used in combination with parametric 3D modelling in SolidWorks and similar CAD systems. 3D models of the main Russian air attack weapons have been created and studied. Particular attention was paid to determining the electromagnetic properties of materials used in the designs of the samples using the NIST methodology, with the parameters obtained subsequently entered into the modelling environment. A series of software experiments was conducted across a wide frequency range to assess the effective scattering area for different irradiation angles. The results obtained made it possible to determine the statistical characteristics of the radar visibility of various types of air targets, to identify the influence of geometry and materials on the effective scattering area, and to provide a basis for further research in the field of radar detection and tracking of airborne objects.*

**Keywords:** *radar visibility, effective scattering area, air attack weapons, 3D modelling, Ansys HFSS, electromagnetic properties of materials.*

### INTRODUCTION

The experience of armed conflict has shown that the enemy is well equipped with various types of air attack weapons (AAW): strike FPV drones and drones with drop-offs, bomb weapons with aerodynamic gliding equipment, long-range strike UAVs, ground-, air- and sea-launched cruise missiles, ground-launched ballistic missiles, and air-launched aeroballistic missiles. Assessment of the current air situation is based on information obtained by deployed sensor systems: optical, acoustic, radio technical reconnaissance, and radar surveillance. Radar systems have the greatest information capabilities, differing in both range and a wide range of observation conditions [1].

To reduce situational awareness of the air situation, the enemy uses a number of technical and tactical measures: the use of radar-invisible shapes, anti-radar coatings, passive (dipole) jammers, and false air targets in modern models, and when choosing routes, the features of the terrain and gaps in the radar field are often used. A comprehensive study of air threat detection at the present stage requires research into the radar visibility characteristics of UAVs and further improvement of models for detecting and tracking airborne objects, taking into account the observation

angle and terrain conditions, which determines the relevance of the study. The main characteristic of radar visibility is the effective scattering area. Its value is determined by the electrical and magnetic properties of the object's material, its spatial configuration, the ratio of its dimensions to the wavelength of radiation, and the orientation of the object relative to the direction of radiation. Existing methods of high-frequency analysis allow obtaining sufficiently accurate analytical solutions for calculating the effective scattering area of objects of simple geometric shape [2, 4]. Real objects of practical interest consist of a large number of details of various shapes, orientations and materials. A large number of recent studies have been aimed at improving calculation methods by simplifying radar cross section RCS models through recalculating the radar visibility characteristics of simple geometric shapes [4, 5]. At the same time, researchers note a significant (by orders of magnitude) change in the RCS of UAVs when the observation angle changes [2, 7]. Many studies are devoted to analyzing the radar visibility characteristics of the most common airborne objects [3, 8-17].

The following indicators are used to assess radar visibility [1,5, 6, 17-18]:

directly the graph of the dependence of the RCS

value on the angular coordinates of the irradiation;  
numerical indicators of characteristic sections of the specified graph (local and global maximum/minimum values and corresponding angular indicators);  
statistical characteristics (mean value, median, statistics of width, asymmetry and kurtosis);  
statistical characteristics in angular sectors from 5 to 15 degrees in the azimuthal plane of object irradiation.

### Materials and Methods

A wide range of studies is devoted to testing hypotheses about the distribution law (DL) of experimentally determined values of RCS (as well as the square root of RCS) from the composition of the inverse secondary radiation diagram for various objects. The null hypothesis uses normal PD [5, 7], Rayleigh [5, 6, 19], lognormal [5, 19],  $\chi^2$  type [6], Weibull [5], Guerra-Tippett [19] and others.

Scientific publications by specialized research institutions [19, 20] are devoted to the study of the radar visibility characteristics of air attack weapons. At the same time, experience in researching debris and captured samples of airborne attack vehicles requires in-depth study of design features, electromagnetic characteristics of materials, and other aspects of radar detection of real airborne objects.

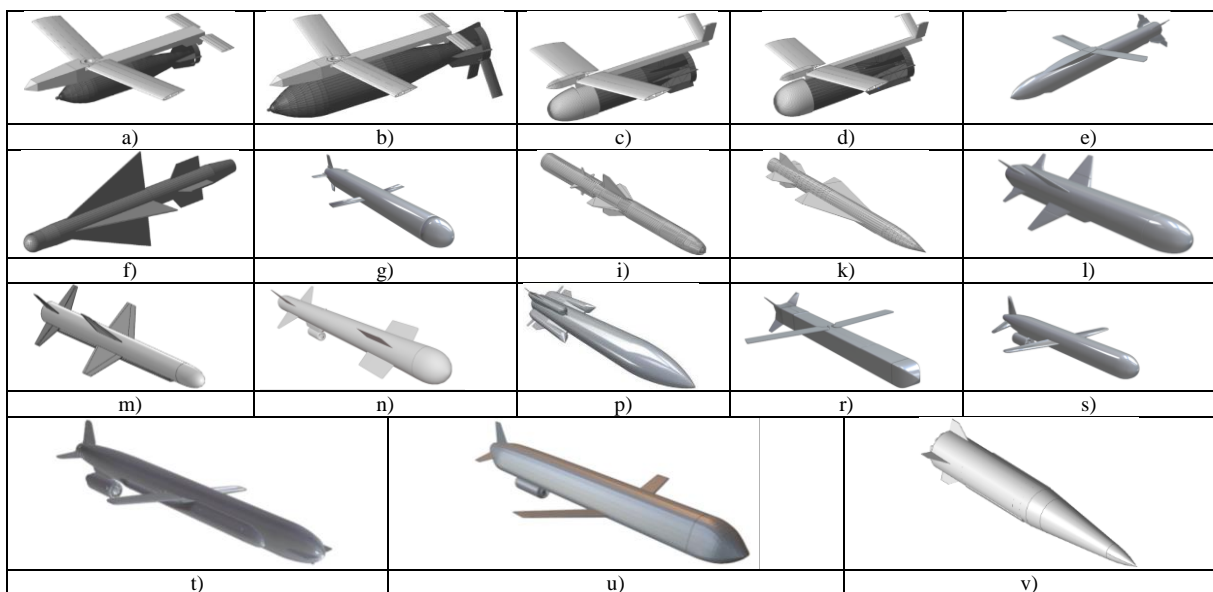
**The aim of the study** was to summarize the practical experience gained and scientific and methodological approaches to studying the radar visibility characteristics of Russian air attack weapons.

### Results

During the scientific and technical examination of the wreckage of the AAW using 3D scanning tools (Artec LEO), as well as by direct measurement, the dimensions, shape and design of the objects were determined, then determines the electromagnetic properties of materials, after which a software experiment was organized.

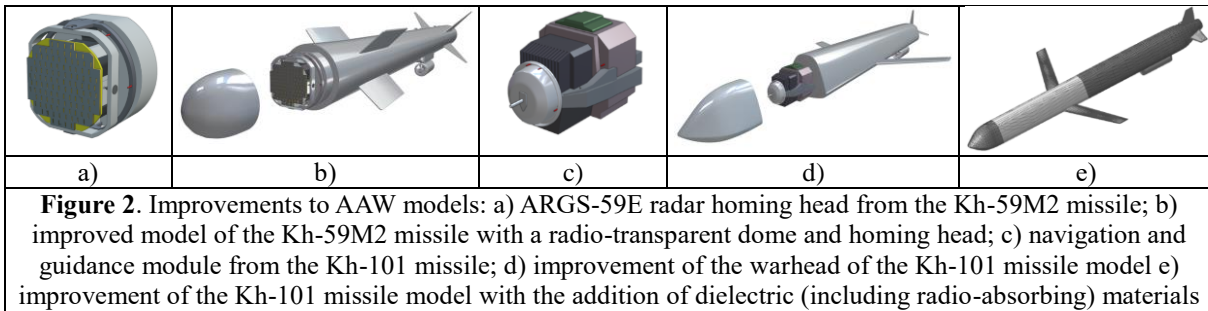
An important task in the creation of 3D models is the selection of an appropriate software editor. Modelling programs can be divided into several main types depending on their purpose and scope of application. The first type of programs (Blender, 3DS Max, Mayan, etc.) are 3D editors that use polygonal modelling and are designed to create three-dimensional models used in animation, visualisation, and other creative industries. In theory, this type of software can be used to perform the tasks at hand, but practical experience has shown that the further conversion of the model file into a suitable format is a problematic issue. The processes of exporting and importing files of different formats for complex models almost always lead to geometry errors, which in turn makes it impossible to obtain adequate calculation results. The second type of software (SolidWorks, NX, Compass-3D, Inventor, Fusion 360) uses parametric solid modelling, which creates models based on volumes, allowing you to accurately calculate and change the dimensions and shape of objects. It is this modelling method that is used to create AAW models (Fig. 1).

*Further improvement of models.* The next stage was the development of 3D models of AAW components, such as the ARG5-59E active radar homing head of the Kh-59MK missile, the Kh-101 navigation and guidance module (Fig. 2), etc. Thanks to the created 3D models of these components, the characteristics of radar visibility are refined and the reliability of the obtained model estimates is increased. The results obtained are planned to be used in the future to study the spatial location of directional diagrams during movement and to assess the capabilities of electronic warfare. At this stage, the electromagnetic properties of materials become an important factor, so the models are becoming increasingly complex: radio-absorbing coatings, radio-transparent domes and other elements are being added (Fig. 2e).



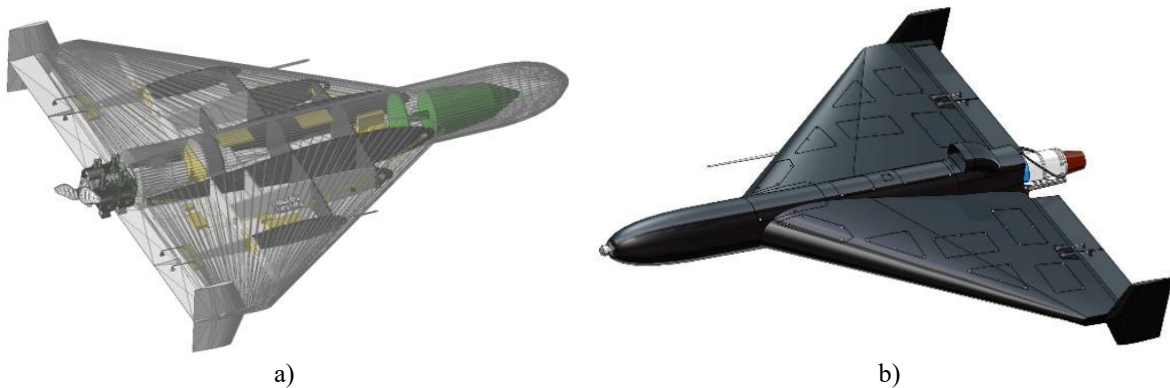
**Figure 1.** Solid-state 3D models of Russian airborne rocket and bomb weapons: a) FAB-250, equipped with UMPC (type 1) ; b) FAB-500 M62, equipped with UMPC (type 1); c) FAB-1500 M54, equipped with UMPC (type 2); d) FAB-3000, equipped with UMPC (type 2); e) Grom-1E; f) UPAB-1500V; g) 3M-14 Kalibr; i)

3M55 Onyx; k) Kh-22; l) Kh-35; m) Kh-38; n) Kh-59M2; p) Kh-31; r) Kh-69; s) Kh-55; t) Kh-555; u) Kh-101; f) 9-S-7760



*Models of unmanned aerial vehicles.* In addition to the AAWs discussed above, the enemy is making

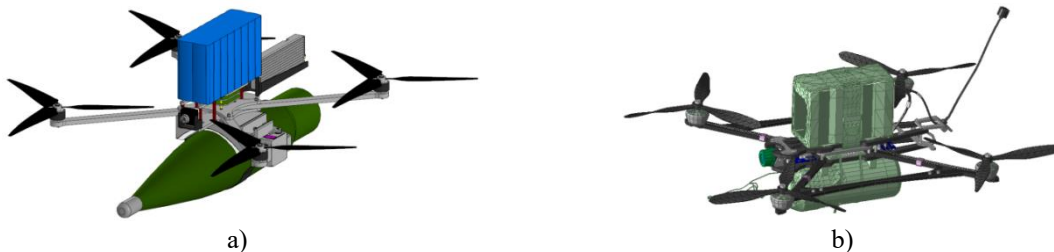
massive use of Shahed-type strike UAVs across virtually the entire territory of Ukraine (Fig. 3).



**Figure 3.** 3D models of long-range unmanned strike vehicles: a) Shahed-136 (Geran-2); b) Geran-3 (with a jet engine)

On the line of combat engagement and in tactical depth, the enemy uses copter-type UAVs (DJI,

AUTEL), the most dangerous of which are strike FPV drones and drones with drop-offs (Fig. 4).

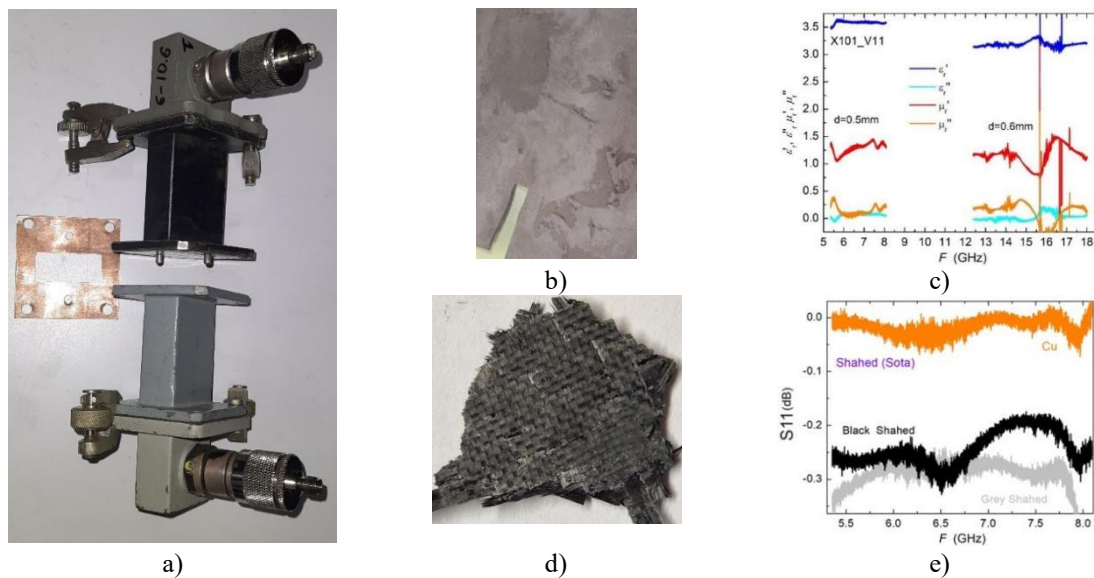


**Figure 4.** 3D models of FPV drones: a) 10" FPV drone with a payload; b) 7" reconnaissance FPV drone

Research into aircraft-type unmanned aerial vehicles (such as ZALA, Orlan, Supercam, Merlin, Eleron, etc.) is limited by the extensive use of dielectric materials in their construction, which requires both additional materials research and significant computing resources for software modelling.

*Determination of the electromagnetic properties of materials.* The electromagnetic properties of individual materials from the AAW composition were determined in accordance with the methodology of the US National Institute of Standards and Technology [21, 22] in collaboration with Kyiv Academic University: material samples were divided into sections measuring approximately 1.5×4 cm and approximately 1.5 mm

thick. The sections were then placed between the open ends of the waveguides, shielded with metal spacers and fixed by compression. After calibration at the surface level of the open flanges of the Thru-Reflect-Line (TRL) waveguide using the method [23], the S-parameters (i.e., transmission and reflection coefficients in the forward and reverse directions) were measured and converted into electromagnetic characteristics: dielectric permeability, dielectric loss tangent, magnetic permeability, magnetic loss tangent. The obtained electromagnetic characteristics of the materials were entered into the material properties in the modelling software package.

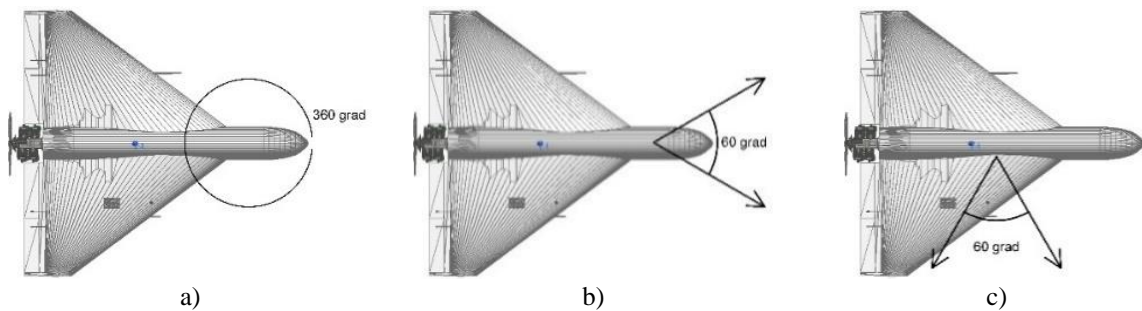


**Figure 5.** Investigation of the electromagnetic properties of materials from the AAW structure: a) coaxial waveguide parts of the experimental setup; b) sample of the anti-radar coating of the Kh-101 missile; c) calculated electromagnetic characteristics of the material from the Kh-101 missile; d) material of the Shahed-136 (Geran-2) UAV body; e) measured values of the reflection coefficient compared to copper

*Software experiment to determine radar visibility characteristics.* Radar visibility characteristics were evaluated Shooting and Bounced Ray method (SBR+) by conducting a software experiment using a software and hardware complex for modelling high-frequency aspects of the functioning of weapons and military equipment samples based on Ansys Academic Research HF ver. 2025 R2. The experiment methodology consisted of creating an HFSS project, importing a prepared solid model (consisting of separate parts), assigning materials with appropriate electromagnetic properties to the parts, and

determining the frequencies and irradiation angles under study. The frequencies were selected in accordance with the operating ranges of existing radar detection systems for airborne objects:  $F = 0.2 \div 15$  GHz. All angles ( $4\pi$  steradian) were studied for further analysis of both ground-based and airborne (aircraft, aerostat) radar systems.

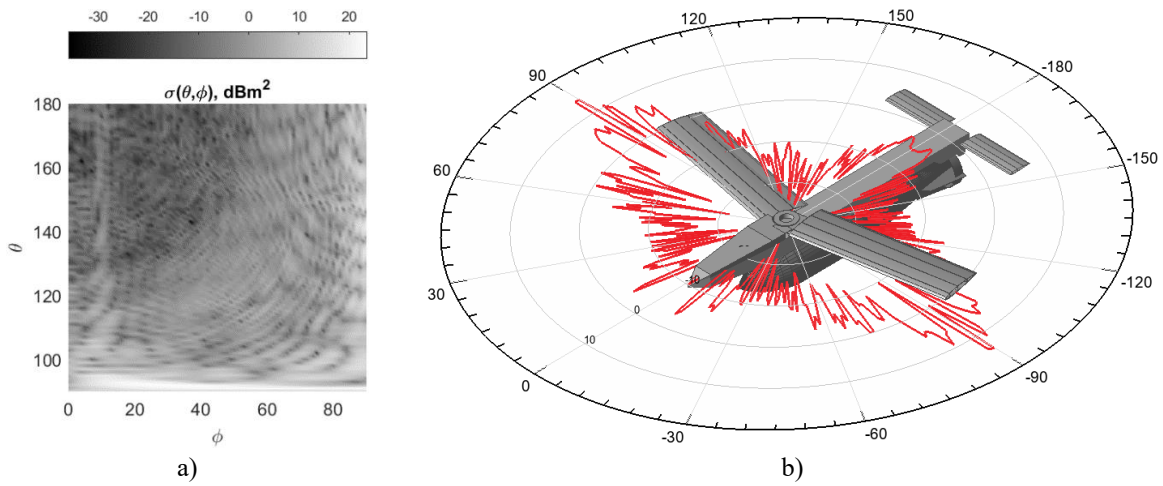
Statistical estimates of radar visibility characteristics were made by determining the median RCS values for different angles of monostatic radar observation (Fig. 6).



**Figure 6.** Example of the angles studied to determine the median RCS values in the azimuth (course) plane: a) ring (circular); b) frontal; c) side

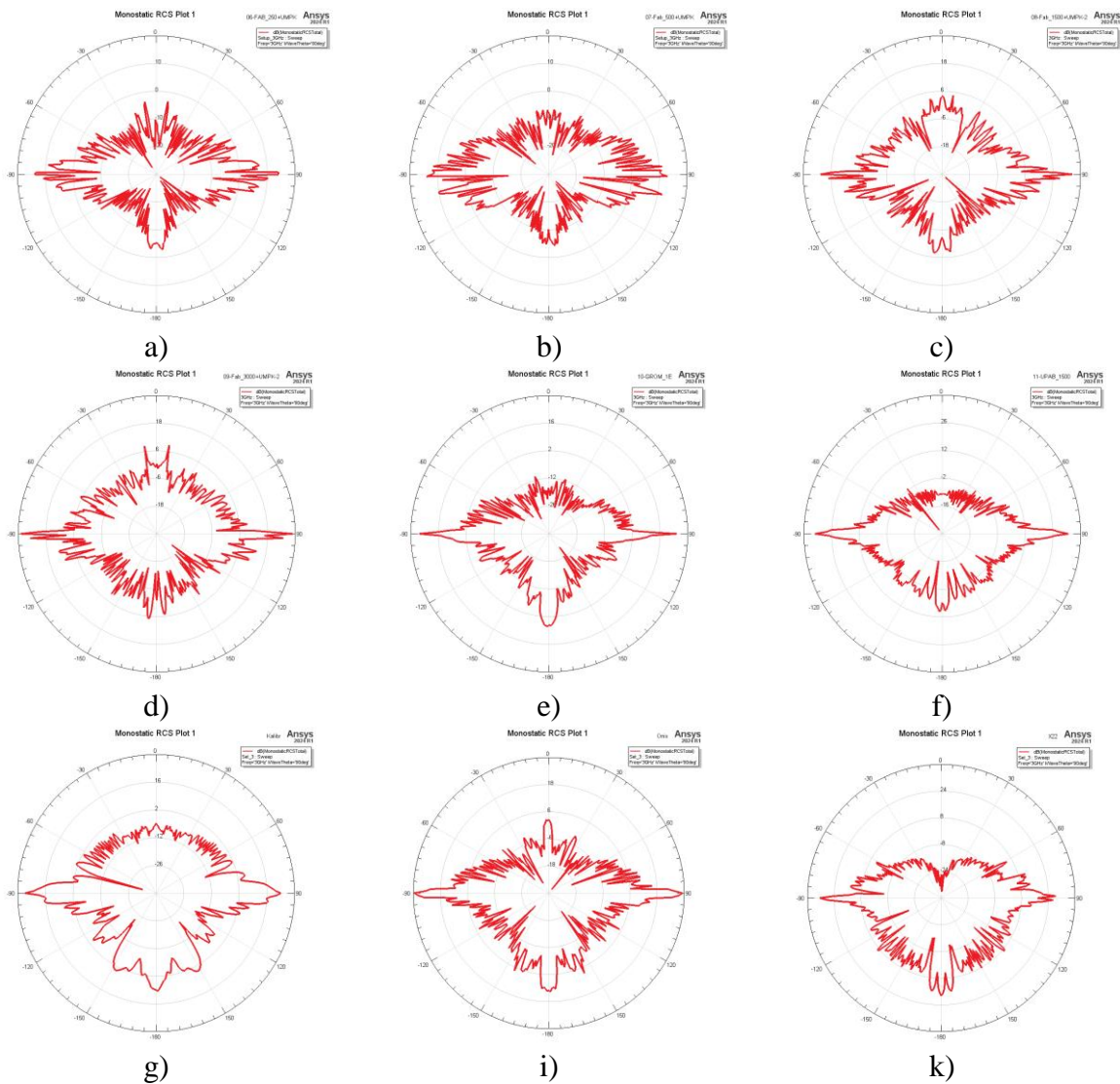
*Results of determining radar visibility characteristics.* Based on the results of software experiments, the primary data for further analysis were

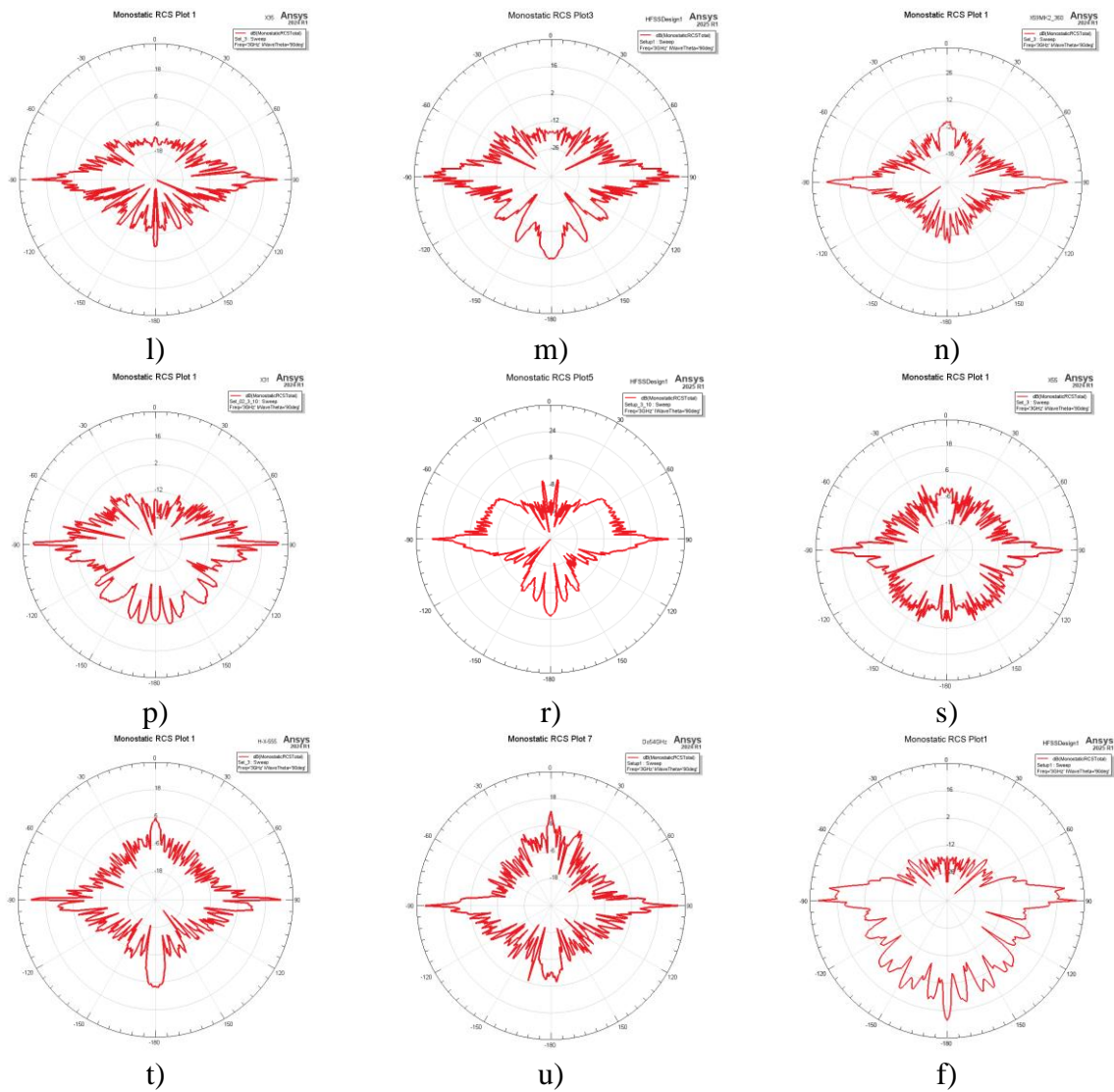
determined by the reverse secondary radiation diagrams (RCS dependence on the observation angle) (Fig. 7).



**Figure 7.** Example of software experiment results: a) reverse secondary radiation pattern for the lower hemisphere of the UMPC with FAB-250 ( $F = 3$  GHz); b) results of RCS calculation in the azimuth (course) plane (zero angle corresponds to the course orientation direction)

The results of software experiments to determine the reverse secondary radiation pattern of the AAW in the azimuth (course) plane are shown in Fig. 8.





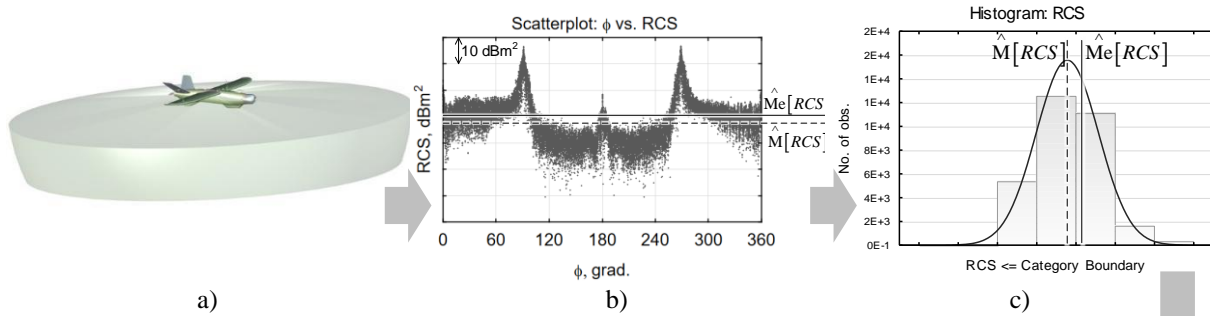
**Figure 8.** Reverse secondary radiation diagrams in the azimuth (course) plane for a frequency of 3 GHz (numbering corresponds to AAW from Fig. 1)

It should be noted that in real cases at real detection ranges of airborne objects (tens to hundreds of kilometers), the predominant observation angles relative to the azimuth (course) plane do not exceed 0.5-1 degree. (except for ballistic and aeroballistic missiles), i.e., the data shown in Fig. 8 is sufficient to evaluate the radar visibility characteristics for most practical cases.

Analysis of the reverse secondary radiation diagrams shows that AAW differ in terms of RCS levels. Differences are observed both in terms of the overall average (median) value and for different

observation angles. Information about the statistical characteristics of the RCS of UAVs for given observation angles can be used as an additional feature for identifying the class of an air object. At the same time, existing models of radar detection and tracking of airborne objects make limited use of information about the RCS of the target and do not take into account information about the observation angle.

The results of software experiments are subject to further statistical processing (Fig. 9) for each group of angles.



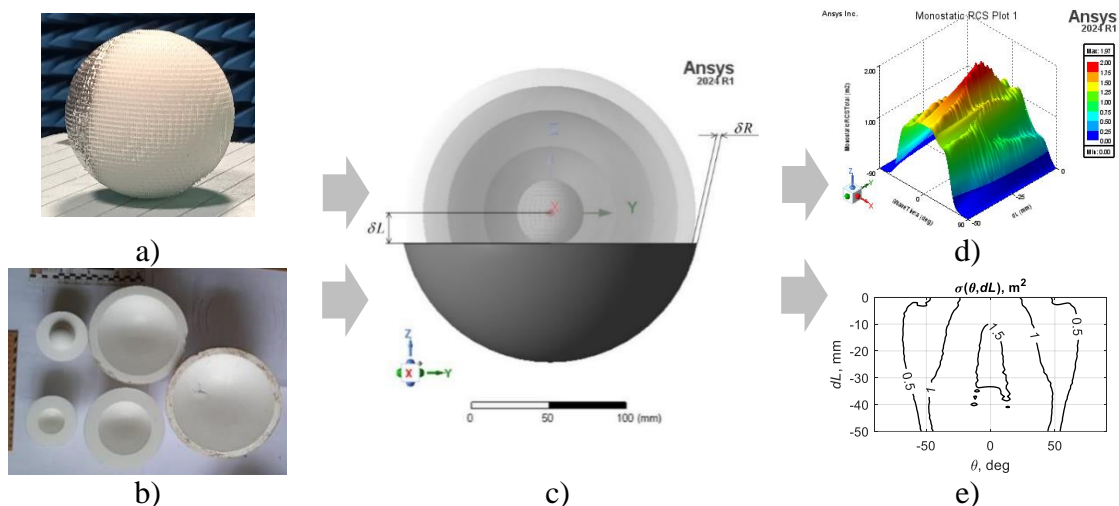
RCS Characteristic	Value
Mean	$\hat{M}[RCS]$
Standard Deviation	5.58 dBm <sup>2</sup>
Maximum values	$\hat{M}[RCS] + (20 \dots 30)$ dBm <sup>2</sup>
Angles of maximum radar visibility	90 degrees and 270 degrees
Minimum values	$\hat{M}[RCS] - (5 \dots 20)$ dBm <sup>2</sup>
Angle of minimum radar visibility	110-250 degrees (except 175-185 degrees)
Belonging to standard distribution laws	not confirmed

d)

**Figure 9.** Stages of statistical processing of information: a) example of the area of studied angles; b) example of a scatter plot; c) example of a distribution histogram and a hypothetical distribution law; d) example of individual statistical characteristics

Airborne objects used by the enemy to create a false air situation and overload air defense systems are equipped with Luneburg lens-type radar reflectors (Fig. 10). The methodology for studying reflectors consisted of studying the properties of materials, creating

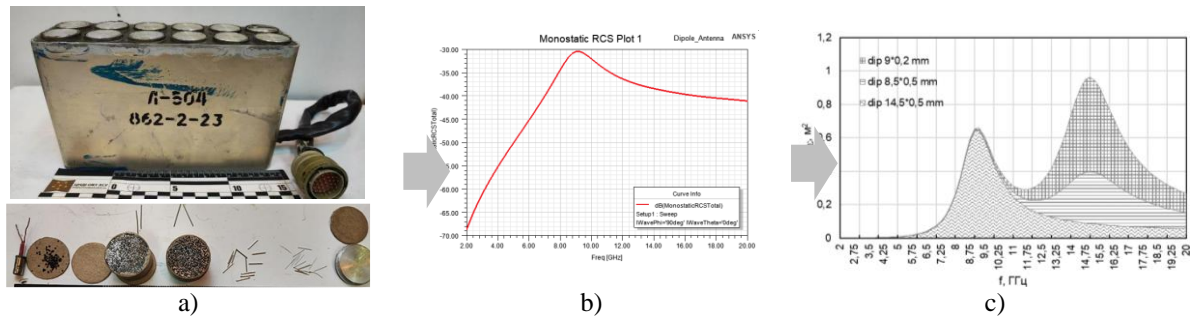
software models, and conducting software experiments [24]. The characteristics obtained were compared with optimal samples and also verified by conducting physical experiments.



**Figure 10.** Example of research on Luneburg lens reflectors: a) from the Parody UAV; b) from the E95M UAV; c) 3D software model; d) example of parametric analysis results; e) example of post-processing of results

The enemy also takes measures to equip individual air defense systems with both active and passive dipole jamming devices in the form of L-504 anti-radar missile launchers. The anti-radar projectile consists of

2-3 types of dipoles that form interference in the operating ranges of the radar equipment of anti-aircraft missile systems (Fig. 11).



**Figure 11.** Example of a study of dipole interference from the L-504 block of the Kh-101 missile: a) external view of the L-504 block and the equipment of one of the anti-radar projectiles; b) example of a study of the frequency dependence of the radar characteristics of one type of dipole; c) averaged estimates of the RCS of a cloud of dipoles created by one type of projectile

### Discussion

Practical work has confirmed that the methodological basis for research into the characteristics of radar visibility of air attack means is appropriate to use: formalization of the characteristics of the shape, size and materials of real objects; creation of 3D models; model experiments to calculate the indicators of reflective properties when irradiated from different angles.

Research into the differences in the radar characteristics of real air targets compared to simulators and passive interference allows us to substantiate the directions for increasing the efficiency of detection and tracking of air attack means.

A further direction for research into the characteristics of radar visibility can be determined as the development of methods for using additional signal (energy) features to identify air objects and assessing the influence of trajectory characteristics on the angle of irradiation and conditions of radar detection.

### Conclusions

A scientific and methodological approach to studying the characteristics of radar visibility of modern air attack means has been developed and tested, which is based on the integration of the results of technical expertise of the remains of equipment, parametric 3D modeling and numerical methods for solving electrodynamic equations (SBR+ method).

A library of verified high-precision 3D models of the main samples of guided and unguided weapons of the Russian Federation (series of missiles Kh-101, Kh-59, 3M-14 "Caliber", aerial bombs with UMPK modules, Shahed-136/131 type UAVs) has been created, which take into account their internal layout, the presence of radio-transparent and radio-absorbing elements.

The electromagnetic properties of structural materials and coatings of captured samples of ZPN have been experimentally determined. The use of refined values of dielectric and magnetic permeability in the Ansys HFSS environment allowed to increase the reliability of the results of modeling the effective scattering surface (ESS) in a wide frequency range (0.2–15 GHz).

Quantitative indicators and angular dependences of the ESS for the studied objects in the  $4\pi$ -steradian space

were obtained. The results confirm a significant fluctuation of the radar visibility values depending on the irradiation angle, which allows to determine the most "vulnerable" sectors for target detection by ground and airborne radars.

A comparative analysis of the signatures of real air attack means and means of simulating the air situation (Lüneberg lenses, dipole reflectors) was carried out. The differences identified in the statistical characteristics of the returned secondary radiation create the basis for improving target selection algorithms and countering enemy electronic warfare means.

The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained data to configure air defense systems, develop new signatures for libraries of automated fire control systems, and optimize the placement of radar posts taking into account the terrain and predicted flight routes of the anti-aircraft missile system.

### Список використаних джерел

- [1.] Y. E. Riapolov, V. A. Vasylets, and O. Y. Sukharevskiy, "Dispersion characteristics of RQ-4B Global Hawk unmanned aerial vehicle in the centimetre and decimetre wavelength ranges," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, vol. 16, no. 3, pp. 25–28, 2014.
- [2.] T. Watanabe and H. Yamada, "Far-field radar cross section determination from near-field 3-D synthetic aperture imaging with arbitrary antenna-scanning surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 7, pp. 5831–5840, 2022, <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3161491>.
- [3.] V. Semkin et al., "Analysing radar cross section signatures of diverse drone models at mm wave frequencies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48958–48969, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979339>.
- [4.] J. W. Crispin and A. L. Maffett, "Radar cross-section estimation for simple shapes," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 833–848, 1965, <https://doi.org/10.1109/PROC.1965.4062>.
- [5.] O. I. Sukharevskiy, V. O. Vasylets, S. V. Nechytailo, et al., *Scattering of Electromagnetic Waves by Air and Ground Objects*, O. I. Sukharevskiy, Ed. Kharkiv, Ukraine: KNAFU, 2009. (in Ukrainian)

- [6.] A. L. Maffett, Topics for a Statistical Description of Radar Cross Section, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 1989.
- [7.] C. J. Li and H. Ling, "Radar signatures of small consumer drones," in Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S/USNC-URSI), Fajardo, Puerto Rico, 2016.
- [8.] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, and A. A. López, "Drone detection and RCS measurements with ubiquitous radar," in Proc. Int. Conf. Radar (RADAR), Brisbane, QLD, Australia, 2018, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8557320>.
- [9.] J. Farlik et al., "Radar cross section and detection of small unmanned aerial vehicles," in Proc. 17th Int. Conf. Mechatronics - Mechatronika (ME), 2016, pp. 1–7.
- [10.] A. Schroder et al., "Numerical and experimental radar cross section analysis of the quadcopter DJI Phantom 2," in Proc. IEEE Radar Conf., 2015, pp. 463–468.
- [11.] C. J. Li and H. Ling, "An investigation on the radar signatures of small consumer drones," IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., vol. 16, pp. 649–652, 2017.
- [12.] P. Sedivy and O. Nemeč, "Drone RCS statistical behaviour," in NATO Modelling & Simulation Group, Sensors & Electronics Technology Panel, Science and Technology Organization, Specialists' meeting on drone detectability: Modelling the relevant signature (MSG\_SET-183 RSM).
- [13.] I. Bouzayene, K. Mabrouk, A. Gharsallah, and D. Kholodnyak, "Scan radar using a uniform rectangular array for drone detection with low RCS," in Proc. 19th Mediterranean Microwave Symp. (MMS), Hammamet, Tunisia, 2019, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/MMS48040.2019.9157299>.
- [14.] G. V. Pevtsov and M. M. Oleshchuk, "Analysis of the capabilities of RTV surveillance radars for detecting, tracking and identifying unmanned aerial vehicles," Weapon Systems and Military Equipment, no. 3(67), pp. 24–30, 2021, <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.03>.
- [15.] M. Pieraccini, L. Miccinesi, and N. Rojhani, "RCS measurements and ISAR images of small UAVs," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 32, pp. 28–32, 2017, <https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160167>.
- [16.] V. P. Ryabukha, "Radar surveillance of unmanned aerial vehicles (overview)," Radioelectronics and Communications Systems, vol. 63, no. 11, pp. 1–22, 2020, <https://doi.org/10.20535/S0021347020110011>.
- [17.] I. D. Olin and F. D. Queen, "Dynamic measurement of radar cross sections," Proceedings of the IEEE, vol. 53, no. 8, pp. 954–961, 1965, <https://doi.org/10.1109/PROC.1965.4074>.
- [18.] M. Ezuma, M. Funderburk, and I. Guvenc, "Compact-range RCS measurements and modeling of small drones at 15 GHz and 25 GHz," in Proc. IEEE Radio and Wireless Symp. (RWS), 2020, pp. 313–316, <https://doi.org/10.1109/RWS45077.2020.9050049>.
- [19.] O. Sukharevsky, V. Vasilets, S. Nechytailo, A. Reznichenko, and H. Kudriashov, "Radar characteristics study of the model of 'Shahed-136' barraging munition," Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, no. 2(51), pp. 56–62, 2023, <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07>.
- [20.] O. Borysenko, "Characteristics of secondary radiation of cruise missiles 3M-14 Calibr and Kh-101 in the VHF band," Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, no. 1(54), pp. 68–76, 2024, <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.54>.
- [21.] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, J. H. Grosvenor, Jr., and R. G. Geyer, "Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability," National Institute of Standards and Technology (NIST), Tech. Note 1355-R, 1993.
- [22.] W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies," Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 1, pp. 33–36, 1974, <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9382>.
- [23.] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [24.] D. S. Zavadskyi, "Results of research on the radar reflector of the Luneberg lens type," Scientific and Technical Journal: State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment, no. 2(8), pp. 75–81.

**Завадський Дмитро Станіславович**

<https://orcid.org/0000-0003-2728-136X>

**Білобородов Олег Олександрович** (доктор технічних наук, старший дослідник)

<https://orcid.org/0000-0003-3166-2659>

**Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ПОМІТНОСТІ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ рф ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ**

У статті представлено науково-методичні підходи та результати досліджень характеристик радіолокаційної помітності сучасних засобів повітряного нападу противника з використанням числових методів моделювання. Для проведення програмного експерименту застосовується програмно-технічний комплекс моделювання високочастотних аспектів функціонування зразків озброєння та військової техніки на

базі Ansys Academic Research HF у поєднанні з параметричним 3D-модельованням у SolidWorks та аналогічних САПР. Проведено створення та дослідження 3D-моделей основних засобів повітряного нападу РФ, зокрема крилатих і аеробалістичних ракет (Х-22, Х-55, Х-59, Х-69, Х-101 тощо), а також авіаційних бомб із планеруючими модулями (УМПК з ФАБ-250, ФАБ-500, ФАБ-1500 тощо). Особливу увагу приділено визначенню електромагнітних властивостей матеріалів, що використовуються у конструкціях зразків, за методикою NIST із подальшим введенням отриманих параметрів у середовище модельовання. Проведено серію програмних експериментів у широкому діапазоні частот для оцінки ефективної площі розсіювання для різних ракурсів опромінення. Отримані результати дозволили визначити статистичні характеристики радіолокаційної помітності різних типів повітряних цілей, виявити вплив геометрії та матеріалів на значення ефективної площі розсіювання і забезпечити основу для подальших досліджень у сфері радіолокаційного виявлення та супроводження повітряних об'єктів.

**Ключові слова:** радіолокаційна помітність, ефективна площа розсіювання, засоби повітряного нападу, 3D-модельовання, Ansys HFSS, електромагнітні властивості матеріалів.

### Список використаних джерел

- [1.] Y. E. Riapolov, V. A. Vasylets, and O. Y. Sukharevskyi, "Dispersion characteristics of RQ-4B Global Hawk unmanned aerial vehicle in the centimetre and decimetre wavelength ranges," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, vol. 16, no. 3, pp. 25–28, 2014.
- [2.] T. Watanabe and H. Yamada, "Far-field radar cross section determination from near-field 3-D synthetic aperture imaging with arbitrary antenna-scanning surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 7, pp. 5831–5840, 2022, <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3161491>.
- [3.] V. Semkin et al., "Analysing radar cross section signatures of diverse drone models at mm wave frequencies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48958–48969, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979339>.
- [4.] J. W. Crispin and A. L. Maffett, "Radar cross-section estimation for simple shapes," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 833–848, 1965, <https://doi.org/10.1109/PROC.1965.4062>.
- [5.] О. І. Сухаревський, В. О. Василець, С. В. Нечитайло та ін., *Розсіювання електромагнітних хвиль повітряними та наземними об'єктами*, О. І. Сухаревський, Ред. Харків, Україна: ХНУПІС, 2009.
- [6.] A. L. Maffett, *Topics for a Statistical Description of Radar Cross Section*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 1989.
- [7.] C. J. Li and H. Ling, "Radar signatures of small consumer drones," in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S/USNC-URSI)*, Fajardo, Puerto Rico, 2016.
- [8.] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, and A. A. López, "Drone detection and RCS measurements with ubiquitous radar," in *Proc. Int. Conf. Radar (RADAR)*, Brisbane, QLD, Australia, 2018, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8557320>.
- [9.] J. Farlik et al., "Radar cross section and detection of small unmanned aerial vehicles," in *Proc. 17th Int. Conf. Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 2016, pp. 1–7.
- [10.] A. Schroder et al., "Numerical and experimental radar cross section analysis of the quadcopter DJI Phantom 2," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, 2015, pp. 463–468.
- [11.] C. J. Li and H. Ling, "An investigation on the radar signatures of small consumer drones," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 649–652, 2017.
- [12.] P. Sedivy and O. Nemeč, "Drone RCS statistical behaviour," in *NATO Modelling & Simulation Group, Sensors & Electronics Technology Panel, Science and Technology Organization, Specialists' meeting on drone detectability: Modelling the relevant signature (MSG\_SET-183 RSM)*.
- [13.] I. Bouzayene, K. Mabrouk, A. Gharsallah, and D. Kholodnyak, "Scan radar using an uniform rectangular array for drone detection with low RCS," in *Proc. 19th Mediterranean Microwave Symp. (MMS)*, Hammamet, Tunisia, 2019, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/MMS48040.2019.9157299>.
- [14.] G. V. Pevtsov and M. M. Oleshchuk, "Analysis of the capabilities of RTV surveillance radars for detecting, tracking and identifying unmanned aerial vehicles," *Weapon Systems and Military Equipment*, no. 3(67), pp. 24–30, 2021, <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.03>.
- [15.] M. Pieraccini, L. Miccinesi, and N. Rojhani, "RCS measurements and ISAR images of small UAVs," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 32, pp. 28–32, 2017, <https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160167>.
- [16.] V. P. Ryabukha, "Radar surveillance of unmanned aerial vehicles (overview)," *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 63, no. 11, pp. 1–22, 2020, <https://doi.org/10.20535/S0021347020110011>.
- [17.] I. D. Olin and F. D. Queen, "Dynamic measurement of radar cross sections," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 954–961, 1965, <https://doi.org/10.1109/PROC.1965.4074>.
- [18.] M. Ezuma, M. Funderburk, and I. Guvenç, "Compact-range RCS measurements and modeling of small drones at 15 GHz and 25 GHz," in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symp. (RWS)*, 2020, pp. 313–316, <https://doi.org/10.1109/RWS45077.2020.9050049>.
- [19.] O. Sukharevsky, V. Vasilets, S. Nechytailo, A. Reznichenko, and H. Kudriashov, "Radar characteristics study of the model of 'Shahed-136' barraging munition," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, no. 2(51), pp. 56–62, 2023, <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07>.
- [20.] O. Borysenko, "Characteristics of secondary radiation of cruise missiles 3M-14 Calibr and Kh-101 in the VHF band," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, no. 1(54), pp. 68–76, 2024, <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.54>.
- [21.] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, J. H. Grosvenor, Jr., and R. G. Geyer, "Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability," *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, Tech. Note 1355-R, 1993.
- [22.] W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 33–36, 1974, <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9382>.
- [23.] Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [24.] D. S. Zavadskyi, "Results of research on the radar reflector of the Luneberg lens type," *Scientific and Technical Journal: State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment*, no. 2(8), pp. 75–81.

# РОЗВИТОК ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ТА СПОСОБІВ ПРОТИДІЇ ЇМ

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-82-91**

**УДК 621.396.96**

<sup>1</sup>Купчин Артем Валерійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>

<sup>1</sup>Солошенко Юрій Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0002-9268-2813>

<sup>2</sup>Кошка Володимир Олегович

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

<sup>3</sup>Лук'яненко Сергій Анатолійович

<https://orcid.org/0009-0002-5936-0476>

<sup>1</sup>Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України, Київ, Україна

<sup>3</sup>Факультет перепідготовки та підвищення кваліфікації авіаційного персоналу Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Миколаїв, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 05.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 26.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ПЛОЩІ РОЗСІЮВАННЯ ЛІНЗ ЛЮНЕБЕРГА, ВСТАНОВЛЕНИХ НА БПЛА ТИПУ “ПАРОДІЯ”

У статті наведено результати теоретичного та експериментального дослідження ефективної площі розсіювання лінз Люнеберга, встановлених на російських безпілотних літальних апаратах типу “Пародія”, у діапазоні частот 8–12 GHz. Проведено чисельне моделювання багатошарових конструкцій у середовищі CST Microwave Studio та лабораторні вимірювання в безеховій камері з використанням двох методів обчислення ефективної площі розсіювання. Встановлено характер кутової та частотної залежності відбиття, визначено розбіжності між теоретичними й експериментальними результатами та оцінено можливість застосування лінз як пасивних радіолокаційних відбивачів для імітації повітряних цілей.

Результати роботи становлять інтерес для науковців і інженерів у галузі радіолокації, а також спеціалістам систем протиповітряної оборони при розробці та вдосконаленні методів протидії хибним повітряним цілям.

**Ключові слова:** лінза Люнеберга, ефективна площа розсіювання, хибна повітряна ціль, радіолокаційний відбивач, безпілотний літальний апарат.

### Вступ

Лінза Люнеберга (ЛЛ) – це сферична діелектрична лінза зі змінним показником заломлення, яка використовується для фокусування та відбиття радіохвиль у широкому діапазоні частот [1]. Її унікальні властивості дозволяють застосовувати її у різних сферах, зокрема в авіації, безпілотних технологіях, радіолокації та комунікаціях [2].

Основна ідея полягає в тому, що показник заломлення всередині сфери змінюється від центру до поверхні за певним законом. У класичному випадку він зменшується за квадратичним законом (1) [3,4]:

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (1)$$

де  $n(r)$  – показник заломлення на відстані  $r$  від центру сфери;

$R$  – радіус лінзи.

Завдяки цьому електромагнітні хвилі, що падають на сферу, фокусуються в певних точках.

У сучасних конструкціях ЛЛ, як правило, реалізується у вигляді багатошарової діелектричної структури зі ступінчастим наближенням закону зміни показника заломлення. Діелектрична проникність кожного шару є сталою та дискретно змінюється від центра до поверхні [5].

Практичний інтерес становить використання ЛЛ як пасивних радіолокаційних відбивачів у складі безпілотних літальних апаратів. Зокрема, у фюзеляжі БПЛА типу “Пародія” розміщено дві ЛЛ (рис. 1), що дозволяє формувати хибні повітряні цілі та змінювати радіолокаційний профіль апарата залежно від поставлених завдань.

Такий підхід ускладнює ідентифікацію об'єкта засобами протиповітряної оборони.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження радіолокаційних характеристик ЛЛ у складі БПЛА, зокрема оцінка їх ефективної площі розсіювання у робочому діапазоні частот.

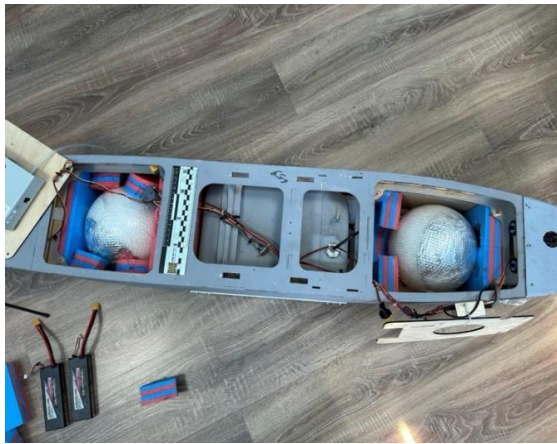


Рисунок 1 – Ніші фюзеляжу БПЛА “Пародія”

Метою статті є теоретичне та експериментальне дослідження ефективної площі розсіювання ЛЛ, встановлених на БПЛА типу “Пародія”, у діапазоні частот 8-12 GHz для оцінки їх радіолокаційних характеристик та можливості імітації повітряних цілей.

### Матеріали та методи

Встановлено, що реалізація ЛЛ з кількістю шарів більше ніж 20 недоцільна і не призводить до істотної зміни характеристик лінзи [6,7]. Як показує практика, найбільшу технологічність мають 4-6-шарові лінзи [8,9]. Саме така кількість шарів найчастіше використовується практично.

На рис. 2 показано посилення електромагнітного поля в нульовому напрямку ЛЛ для різного електричного діаметра та кількості шарів [1]. Видно, що різниця в кількості 12 ... 20 шарів призводить до відмінностей у потужності випромінювання не більше ніж на 2-3% у всьому аналізованому діапазоні довжин хвиль.

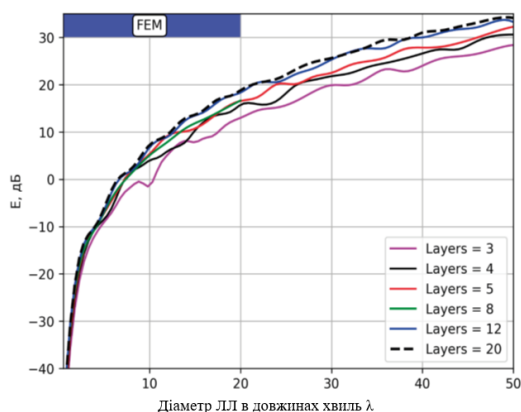


Рисунок 2 – Залежність електромагнітного поля від електричного діаметра та кількості шарів ЛЛ

Прототипування з використанням 3D принтерів відкрило нові можливості виготовлення цих лінз. Як базовий матеріал використовується PLA-пластик з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_b=3,1$ . Зменшувати середню діелектричну проникність кожного шару лінзи можна за допомогою кубічних отворів. Додавання повітряних заповнень кубічної форми різного розміру та з різним кроком дозволяє зменшувати

діелектричну проникність до необхідного значення. Приклад сфери лінзи з подібним наповненням наведено на рис. 3. Регулювання діелектричної проникності здійснюється за допомогою трьох параметрів:  $a$  – розмір сторін кубічного елемента,  $b$  – відстань між елементами,  $n$  – кількість елементів. Для досягнення найбільш задовільних електродинамічних параметрів при проходженні хвилі через подібну структуру має дотримуватися умова  $a \ll \lambda$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі.

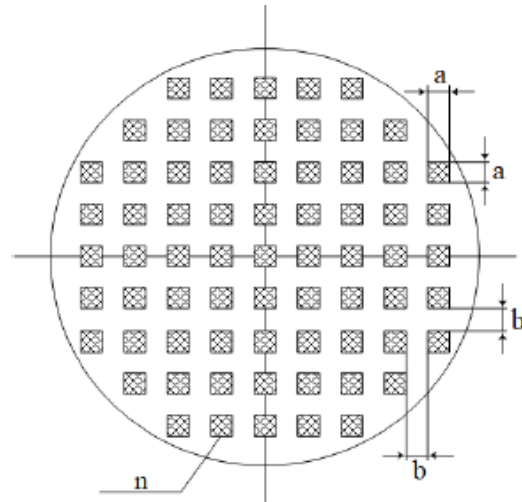


Рисунок 3 – Сфера ЛЛ з повітряними заповненнями кубічної форми різного розміру та різним кроком

У табл. 1 для різної кількості шарів ( $L$ ) наводяться параметри діелектричної проникності кожного шару ( $\epsilon$ ) та відносний радіус ( $R_e$ ) шару [6].

Таблиця 1

### Параметри діелектричної проникності та відносні радіуси шарів

$L$	$R_e$	$\epsilon$
1	0.82	1.67
2	0.63; 0.89	1.8; 1.4
3	0.53; 0.75; 0.93	1.86; 1.57; 1.28
4	0.47; 0.67; 0.82; 0.94	1.88; 1.67; 1.44; 1.22
5	0.43; 0.60; 0.74; 0.85; 0.95	1.91; 1.73; 1.55; 1.36; 1.18
6	0.39; 0.56; 0.68; 0.78; 0.88; 0.96	1.93; 1.77; 1.61; 1.46; 1.31; 1.16
7	0.37; 0.52; 0.63; 0.73; 0.82; 0.89; 0.97	1.93; 1.80; 1.67; 1.53; 1.40; 1.27; 1.13
8	0.34; 0.49; 0.59; 0.69; 0.77; 0.84; 0.91; 0.97	1.94; 1.82; 1.71; 1.59; 1.47; 1.35; 1.24; 1.12

Над наявними лінзами був проведений експеримент з використанням теоретичних та експериментальних даних.

*Проведення теоретичного розрахунку ефективної площі розсіювання перфорованих лінз Люнеберга*

Потенційно можливе значення ЕПР для сферичної ЛЛ знаходиться за такою формулою [10-12]

$$\sigma_{max} = \frac{4\pi^3 R^4}{\lambda^2}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі.

Графік залежності максимально досяжної ЕПР сферичної ЛЛ від частоти наведено на рис. 4.

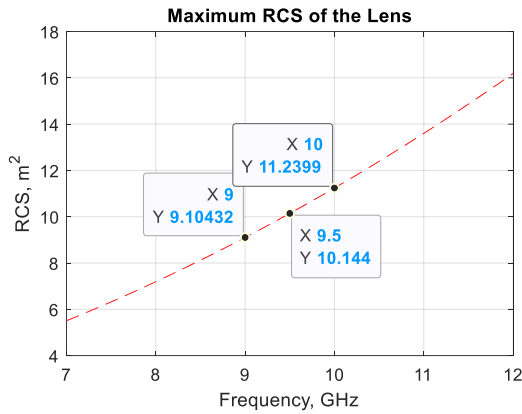


Рисунок 4 – Графік залежності максимально досяжної ЕПР сферичної ЛЛ від частоти

Розташування перфорованої ЛЛ при моделюванні у середовищі CST Microwave Studio та пов'язані з нею кути огляду показані на рис. 5.

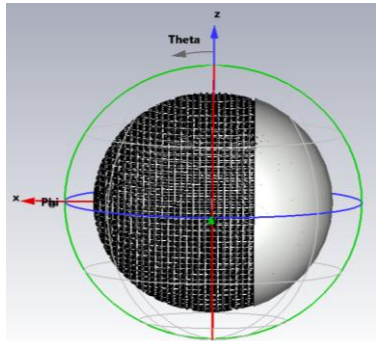


Рисунок 5 – Розташування перфорованої ЛЛ при моделюванні у середовищі CST Microwave Studio

У табл. 2 наводяться номер, радіус та діелектрична проникність ( $\epsilon$ ) шарів ( $L$ ) для шести-, п'яти- та чотиришарової неперфорованої ЛЛ за характеристиками аналогічної перфорованої [5].

Таблиця 2

Параметри шарів неперфорованої лінзи Люнберга за характеристиками перфорованої

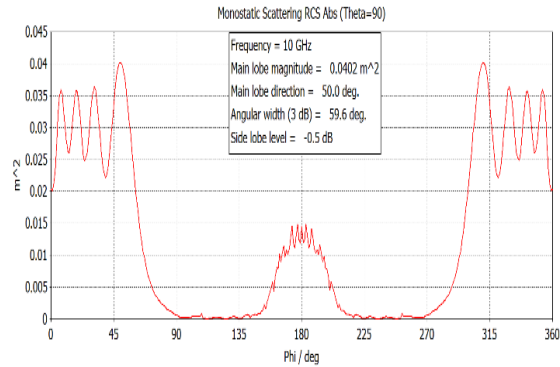
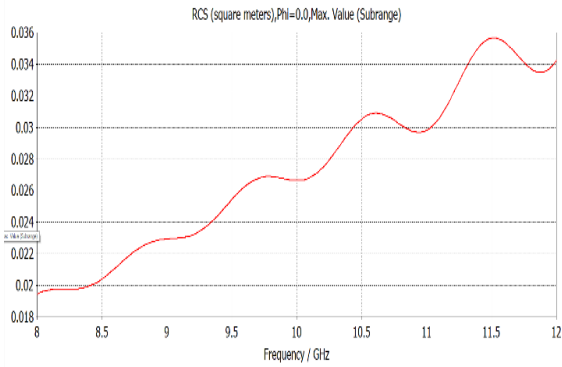
L	6 шарів		5 шарів		4 шарів	
	R шару [mm]	$\epsilon$	R шару [mm]	$\epsilon$	R шару [mm]	$\epsilon$
1	95	1.16	95	1.18	95	1.22
2	87.08	1.31	85	1.36	82.87	1.44
3	77.19	1.46	74	1.55	67.71	1.67
4	67.29	1.61	60	1.73	47.5	1.88
5	55.42	1.77	43	1.91		
6	38.6	1.93				

Результати розрахунку ЕПР [m²] неперфорованої ЛЛ з дзеркалом (лінза діаметром  $a = 190$  mm і металізованим фрагментом – чашею висотою 63 mm), що опромінюється в діапазоні частот 8-12 GHz (Theta = 90°, Phi = 0°) для шести (а), п'яти (б) та чотирьох (в) шарів наведено на рис. 6.

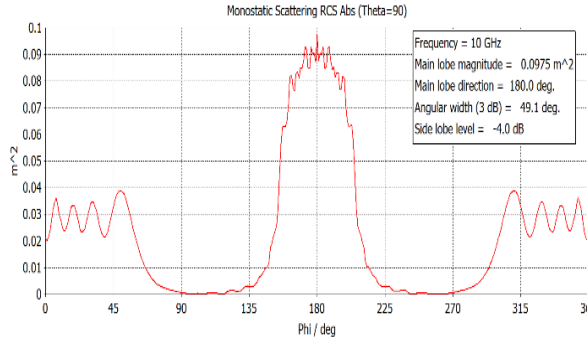
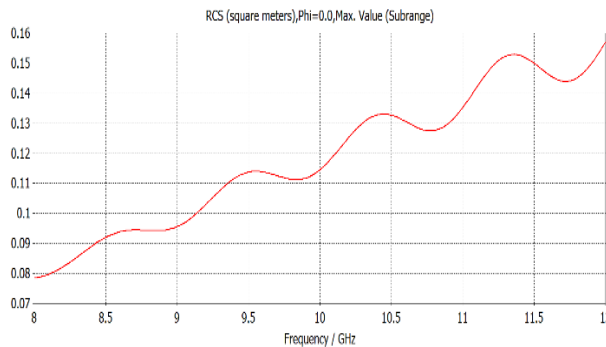
Проведення експериментального розрахунку ефективної площі розсіювання перфорованих лінз Люнберга у лабораторних умовах

Експериментальні дослідження проводилися в безеховій камері з використанням спеціальної вимірювальної установки.

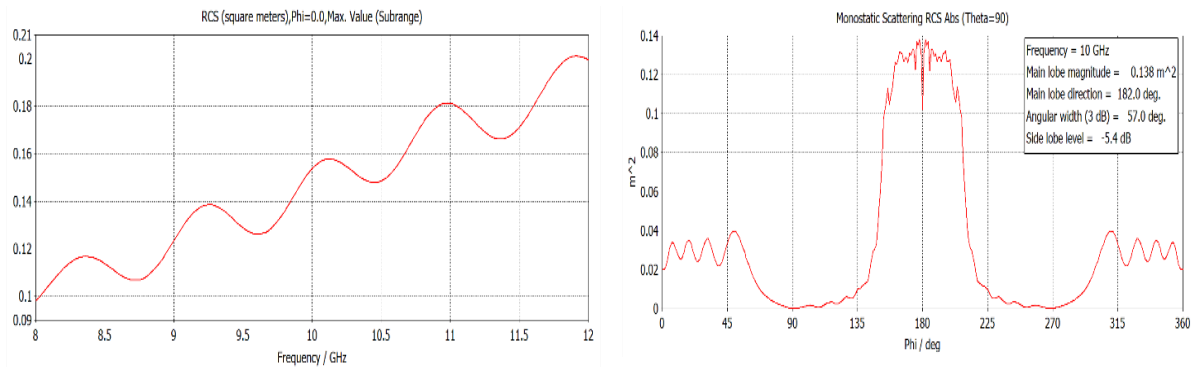
При вимірі відбиття від ЛЛ використовується пінопластовий стенд з лінзою, який обертається за допомогою спеціального майданчика з дискретом 2° в діапазоні від 0° до 360° для перфорованої лінзи.



а) шість шарів



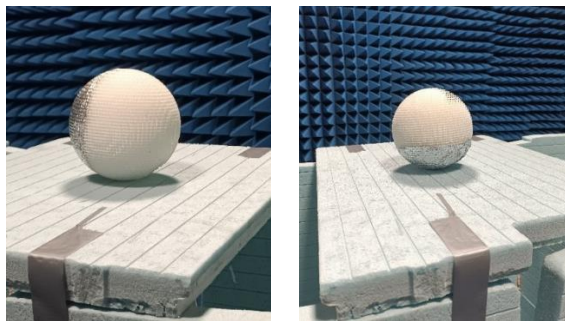
б) п'ять шарів



в) чотири шари

Рисунок 6 – Результати розрахунку ЕПР [m<sup>2</sup>] неперфорованої ЛЛ

Перфорована ЛЛ досліджувалась у двох позиціях (рис. 7):



а) лінза тарілочкою до випромінювача  
б) лінза тарілочкою до низу

Рисунок 7 – Експериментальні дослідження ЛЛ

Для проведення експериментального розрахунку використовувалась наступна методика:

- 1) завдання діапазону частот, в якому проводяться виміри [7GHz, 12GHz], дискретно за частотою = 20 MHz і необхідний розмір вибірки, що усереднюється (N = 200 випробувань);
- 2) вибір режиму вимірів:
  - а) тільки фонові вимірювання та шум приймача;
  - б) вимірювання лінзи та її підставки на тлі шуму та відбиття від елементів камери;
- 3) проведення статистичних випробувань з опроміненням у заданому діапазоні частот, у різних позиціях для перерахованих режимів вимірювання;
- 4) формування квадратурних складових відображень відповідно до обраного режиму;
- 5) обробка даних виміру;
- 6) обчислення ЕПР лінз з урахуванням теоретичної залежності (рівняння радіолокації) з допомогою підстановки експериментальних даних:
  - метод 1 – у вигляді потужності сигналу, відбитого від лінзи;
  - метод 2 – у вигляді потужності сигналів, відбитих від лінзи та від еталона (калібровочної

цілі), а також розрахованої теоретичним шляхом ЕПР еталона (рисунок 6);

7) Розрахунок вибіркового середнього ЕПР лінзи  $\sigma_t = (f_m)$  за усереднення за частотами чи кутами спостереження.

Для мінімізації впливу на результати оцінки ЕПР лінзи  $\sigma_t = (f_m)$  помилкових викидів, викликаних некоректними умовами експерименту або впливом відбитків, що заважають, проводиться цензурування вихідної вибірки:

включаються максимальні значення, які суттєво перевищують теоретично розраховані значення;

виключаються значення, значно менші ніж фонове відображення.

Обробка отриманих експериментальних даних вимірювання ЕПР перфорованої лінзи Люнеберга проводилася у пакеті прикладних програм MATLAB R2022a.

Для наочності відображення отриманих результатів ЕПР у початковій позиції ( $Az = 0deg$ ) лінза Люнеберга розташовується металевою частиною до опромінювача. Таке розташування дозволяє без розривів відобразити залежність ЕПР основної частини ЛЛ від кута опромінення.

### Результати

*Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Люнеберга першим методом у першій позиції (тарілочкою до випромінювача)*

На рис. 8 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в першій позиції від частоти. Значення наведено для трьох ракурсів:  $Az = 180deg$  – опромінюється частина лінзи, протилежна до металу;  $Az = 90deg$ ;  $Az = 0deg$  – опромінюється металізована частина лінзи.

На рис. 9 показана залежність ЕПР ЛЛ від азимуту для трьох значень частоти:

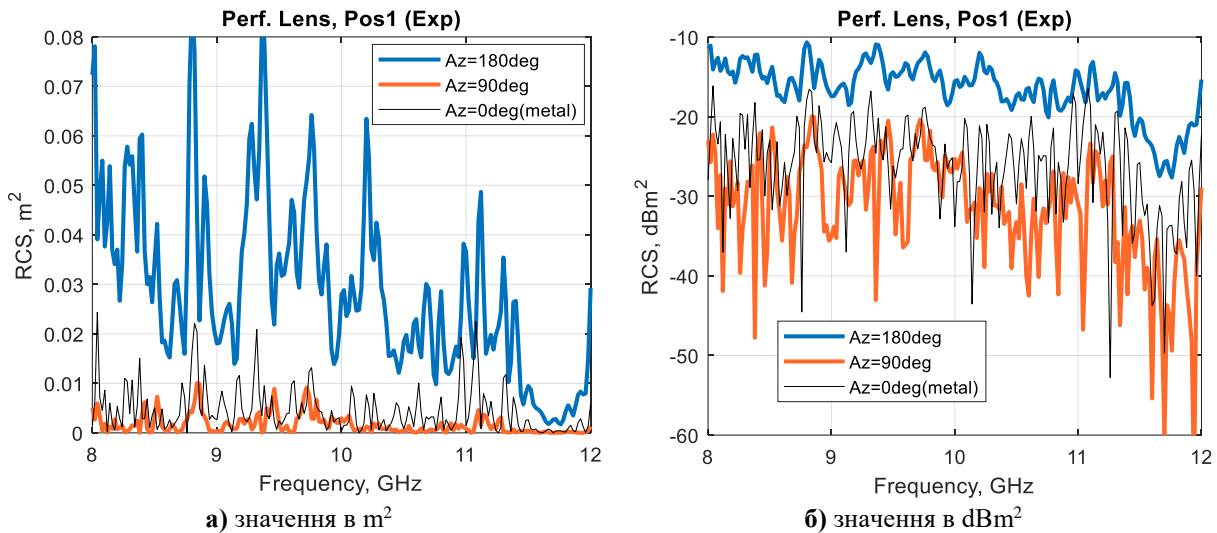


Рисунок 8 – Залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в першій позиції, від частоти

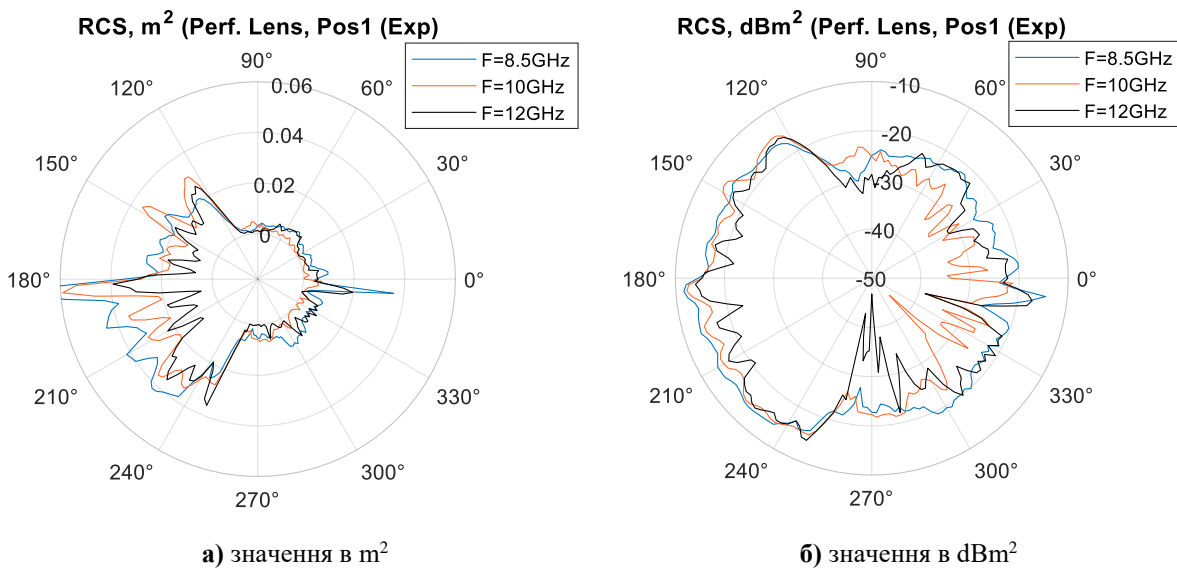


Рисунок 9 – Залежність ЕПР ЛЛ від азимуту для трьох значень частоти

На основі аналізу графіків можна стверджувати наступне:

відбиття від основної частини перфорованої лінзи значно перевищують відбиття від металізованої частини;

ЕПР перфорованої лінзи менше теоретично розрахованого значення, але при цьому перфорована лінза відображає у ширшому кутовому діапазоні.

Нерівномірний характер відбиття від перфорованої лінзи може бути наслідком суттєвих пошкоджень металевого покриття та діелектричної частини лінзи.

Істотна відмінність теоретично розрахованих та експериментальних даних пояснюється такими факторами:

неможливістю точно виміряти внутрішні розміри осередків лінзи;

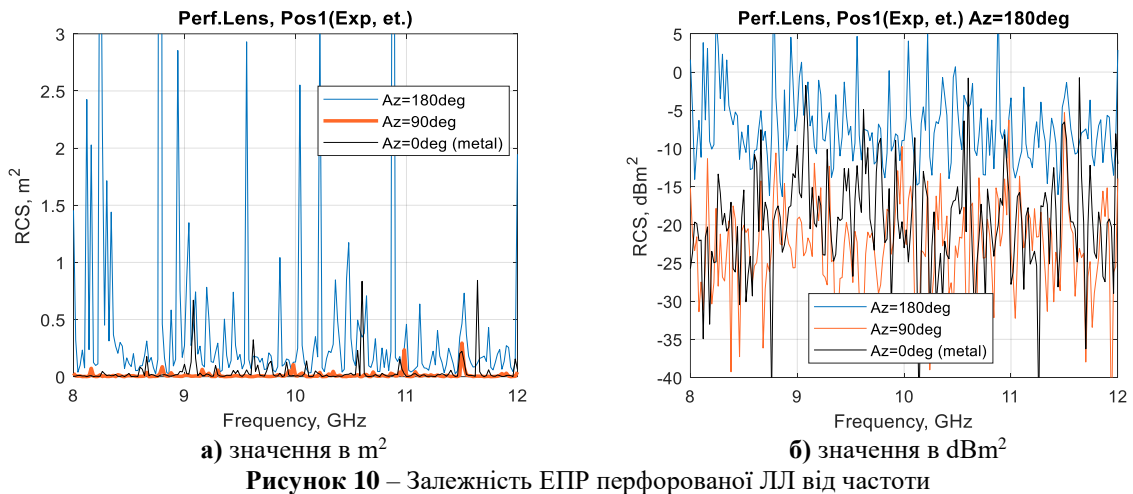
невідомим значенням діелектричної проникності шарів лінзи;

невідомою кількістю шарів з різною діелектричною проникністю.

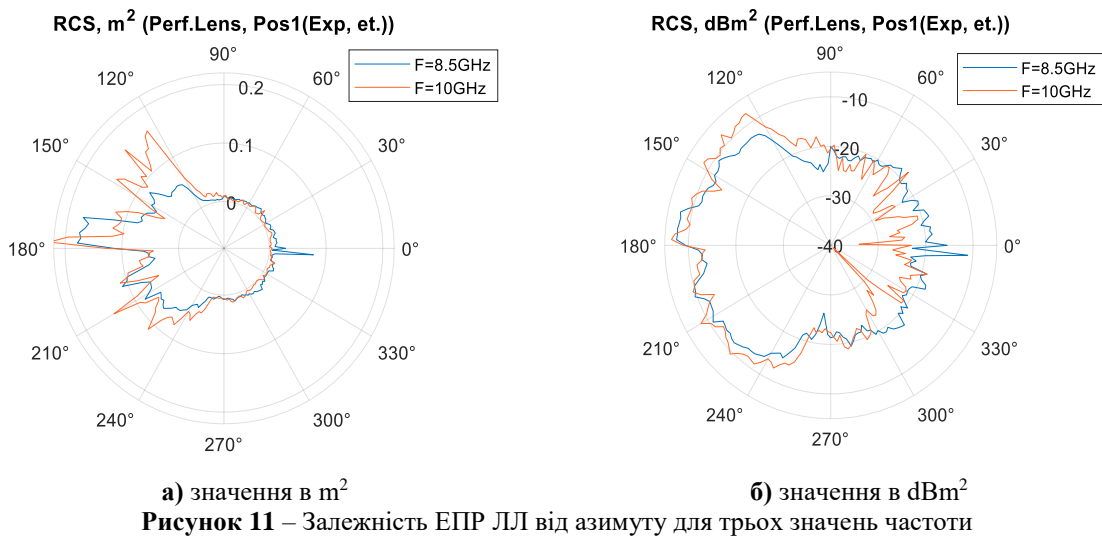
*Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Люнеберга другим методом у першій позиції (тарілочкою до випромінювача)*

На рис. 10 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в першій позиції від частоти. Значення наведено для трьох ракурсів:  $Az = 180deg$  – опромінюється частина лінзи протилежна до металу;  $Az = 90deg$ ;  $Az = 0deg$  – опромінюється металізована частина лінзи.

На рис. 11 показана залежність ЕПР ЛЛ від азимуту для трьох значень частоти:



**Рисунок 10** – Залежність ЕПР перфорованої ЛЛІ від частоти



**Рисунок 11** – Залежність ЕПР ЛЛІ від азимуту для трьох значень частоти

При розрахунку цим методом так само, як і при розрахунку методом 1:

відбиття від основної частини перфорованої лінзи значно перевищують відбиття від металізованої частини (у цьому варіанті відмінність у відбиттях від металеві та основної частин збільшилася на 5 dB у порівнянні з розрахунком методом 1);

перфорована лінза відображає в більш широкому кутовому діапазоні, ніж теоретично розрахована лінза;

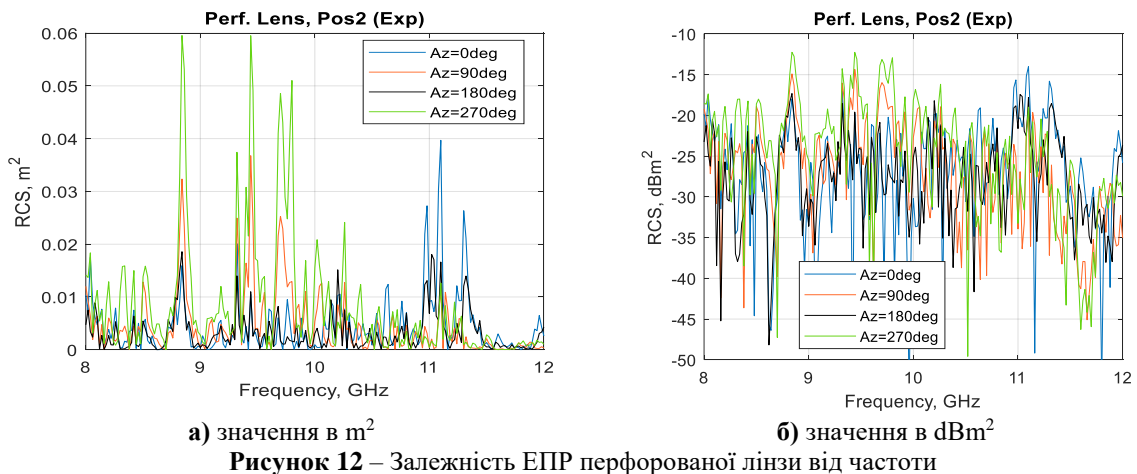
ЕПР перфорованої лінзи має суттєву

нерівномірність, що може бути наслідком суттєвого пошкодження досліджуваного зразка лінзи.

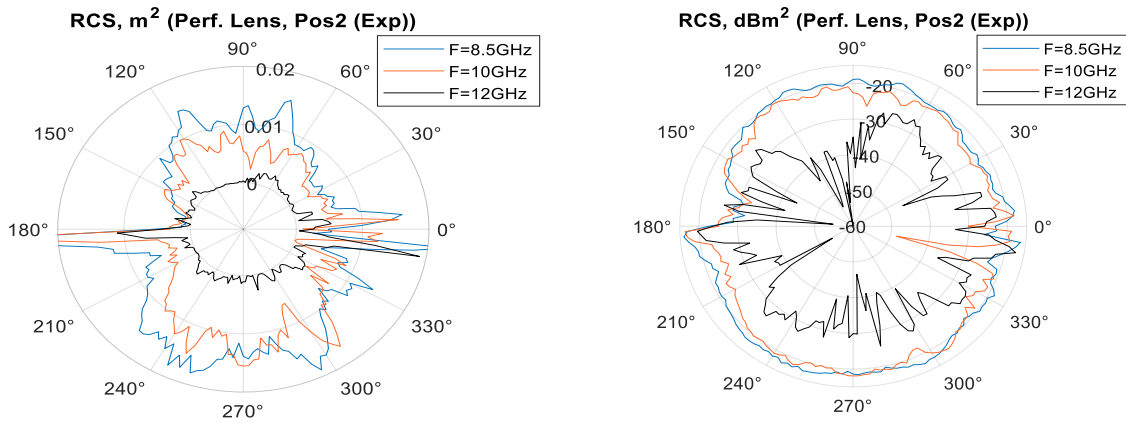
*Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Люнеберга першим методом у другій позиції (тарілочкою вниз)*

На рис. 12 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛІ, розташованої в другій позиції від частоти. Значення наведено для чотирьох ракурсів: Az = 0deg; Az = 90deg; Az = 180deg; Az = 270deg.

На рис. 13 показана залежність ЕПР лінзи від азимуту для трьох значень частоти:



**Рисунок 12** – Залежність ЕПР перфорованої лінзи від частоти



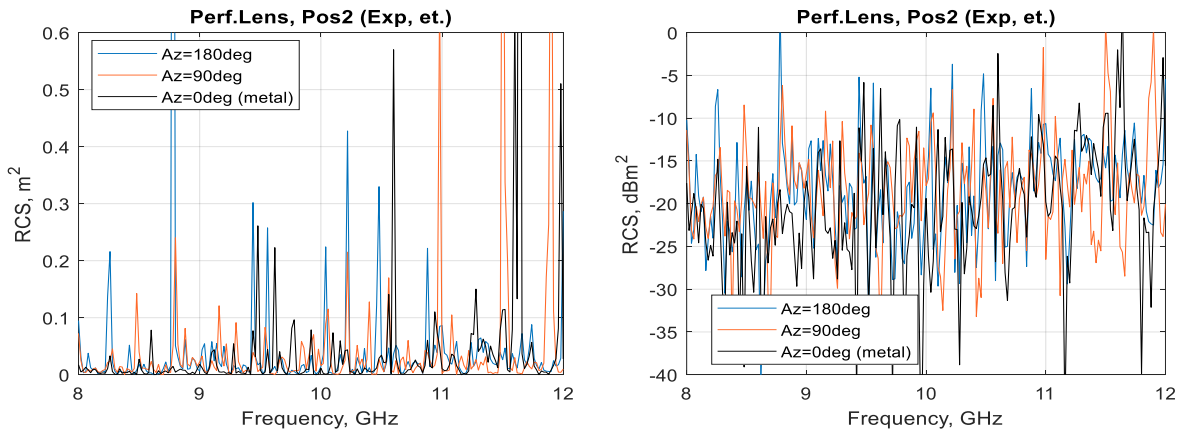
а) значення в  $m^2$  б) значення в  $dBm^2$   
**Рисунок 13** – Залежність ЕПР перфорованої лінзи від азимуту

Як видно з наведених графіків, ЕПР перфорованої ЛЛ може досягати 0,015 – 0,02  $m^2$ . Такий ефект може бути наслідком пошкодження металізованої частини лінзи, у цьому випадку ЕПР непошкодженої лінзи може потенційно збільшитись на 5-7  $dBm^2$ .

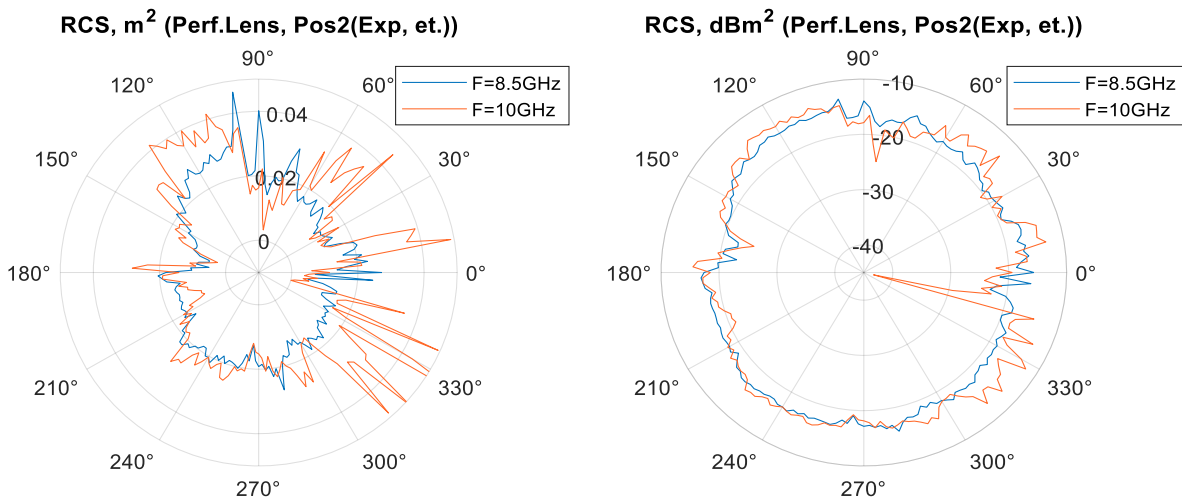
На рис. 14 наведено залежності ЕПР перфорованої ЛЛ, розташованої в другій позиції від частоти. Значення наведено для трьох ракурсів:  $Az = 0deg$ ;  $Az = 90deg$ ;  $Az = 180deg$ .

На рис. 15 показана залежність ЕПР лінзи від азимуту для трьох значень частоти:

*Результати розрахунку ефективної площі розсіювання лінзи Лунеберга другим методом у другій позиції (тарілочкою вниз)*



а) значення в  $m^2$  б) значення в  $dBm^2$   
**Рисунок 14** – Залежність ЕПР перфорованої лінзи від частоти



а) значення в  $m^2$  б) значення в  $dBm^2$   
**Рисунок 15** – Залежність ЕПР перфорованої ЛЛ від азимуту

Згідно з наведеними графіками, ЕПР перфорованої ЛЛ може досягати  $0,04 \text{ m}^2$ . Суттєва нерівномірність ЕПР ЛЛ може бути наслідком пошкодження металізованої частини лінзи, у цьому випадку ЕПР непошкодженої лінзи може потенційно збільшитись на  $5 - 7 \text{ dBm}^2$ .

*Середня оцінка ефективної площі розсіювання лінз Люнеберга*

У табл. 3 наведено чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на першій позиції, розраховані теоретично та за експериментальними даними.

У табл. 4 наведено чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на другій позиції, розраховані за експериментальними даними.

Наведені у таблицях дані усереднюються по куту в діапазоні від  $90^\circ$  до  $270^\circ$ .

Таблиця 3

**Чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на першій позиції**

Позначення	8 – 12 GHz					9 – 10 GHz
	8 GHz	9 GHz	10 GHz	11 GHz	12 GHz	Mean value
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від $90^\circ$ до $270^\circ$ )						
CST, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] (4 шари)	9.8E-2	1.2E-1	1.5E-1	1.8E-1	1.99E-1	1.3E-4
CST, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] (5 шарів)	7.83E-2	9.6E-2	1.1E-1	1.4E-1	1.6E-1	1.1E-1
CST, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] (6 шарів)	1.95E-2	2.3E-2	2.7E-2	2.98E-2	3.4E-2	2.5E-2
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 1 метод	5.0E-4	3.07E-4	3.0E-3	7.97E-4	1.3E-3	2.7E-3
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 2 метод	2.56E-1	8.3E-1	7.1E-2	3.2E-1	6.7E-1	1.2E-1

Таблиця 4

**Чисельні значення ЕПР перфорованої ЛЛ на другій позиції**

Позначення	8 – 12 GHz					9 – 10 GHz
	8 GHz	9 GHz	10 GHz	11 GHz	12 GHz	Mean value
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від $0^\circ$ до $90^\circ$ )						
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 1 метод	1.45E-2	2.7E-3	5.6E-3	3.1E-3	1.3E-3	6.2E-3
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 2 метод	6.03E-2	1.86E-1	2.04E-2	3.5E-2	2.23E-1	3.28E-2
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від $90^\circ$ до $180^\circ$ )						
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 1 метод	1.46E-2	1.9E-3	5.3E-3	1.6E-3	6.23E-4	4.7E-3
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 2 метод	1.3E-1	2.7E-1	2.4E-2	2.4E-2	1.2E-2	3.3E-2
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від $180^\circ$ до $270^\circ$ )						
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 1 метод	2.1E-2	3.2E-3	9.0E-3	3.8E-3	1.5E-3	8.4E-3
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 2 метод	4.4E-2	2.9E-1	1.78E-2	4.5E-2	1.9E-1	2.78E-2
Перфорована лінза Люнеберга (діапазон усереднення від $270^\circ$ до $360^\circ$ )						
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 1 метод	1.87E-2	3.8E-3	9.0E-3	5.9E-3	2.2E-3	7.1E-3
Експеримент, $\sigma$ [ $\text{m}^2$ ] 2 метод	4.4E-2	7.4E-2	2.2E-2	7.2E-3	1.03E-2	2.3E-2

### Обговорення

1. З аналізу графіків можна зробити висновок, що ЕПР основної частини перфорованої лінзи на  $10\text{-}15 \text{ dBm}^2$  (залежно від частоти) перевищує ЕПР металізованої частини в широкому кутовому діапазоні ( $\approx 120^\circ$ ).

2. Максимальне ЕПР перфорованої лінзи, обчислене за першим методом на  $5 - 7 \text{ dBm}^2$  менше теоретично розрахованого значення, що може бути наслідком неврахованого фактору, що впливає на рівень відображення від імітатора цілі. Це припущення підтверджується тим, що:

експериментальна оцінка ЕПР калібрувальної сфери (усереднене за кутовими координатами в діапазоні  $9\text{-}10 \text{ GHz}$  значення) у  $2\text{-}3$  рази менше (залежно від обраного теоретичного методу), ніж теоретично розраховане у CST;

максимальне ЕПР перфорованої лінзи, обчислене за другим методом, досягає та перевищує рівень теоретично розрахованого ЕПР перфорованої лінзи.

3. Відмінність теоретично розрахованих та експериментальних даних пояснюється такими факторами:

неможливістю точно виміряти внутрішні розміри осередків лінзи;

невідомим значенням діелектричної проникності матеріалу лінзи;

невідомою кількістю шарів з різною діелектричною проникністю.

4. Залежність ЕПР перфорованої лінзи на другій позиції істотно залежить від азимуту (вагається в межах  $5\text{-}7 \text{ dBm}^2$ ), хоча теоретично повинен мати постійний рівень. Така нерівномірність може бути наслідком суттєвих пошкоджень металевого покриття та діелектричної частини лінзи.

З порівняння ЕПР перфорованої ЛЛ з ракурсу  $90^\circ$  при першій і другій позиціях видно, що експериментально оцінене значення ЕПР першої позиції близько до мінімальної оцінки для другої позиції. Зважаючи на суттєві пошкодження дослідного зразка, потенційно можливе збільшення ЕПР непошкодженої перфорованої лінзи на  $5\text{-}7 \text{ dBm}^2$ .

5. Частотні властивості досліджуваного рефлектора радіолокаційних сигналів типу лінзи Люнеберга у цілому відповідають теоретичним: характеристики радіолокаційної помітності у частотному діапазоні  $8\text{-}12 \text{ GHz}$  можна у цілому вважати сталими (коливання величини ЕПР до  $4$  разів можна вважати незначними).

6. Максимальні значення ЕПР у робочому діапазоні кутів складають  $0,02\text{-}0,06 \text{ m}^2$ , що для лінзи такого розміру недостатньо високе значення. Теоретичні розрахунки для оптимальної  $4$ -шарової ЛЛ аналогічного розміру складає  $0,5\text{-}1,5 \text{ m}^2$ . Можна припустити, що реальні відбивні властивості досліджуваної лінзи в  $2\text{-}3$  рази краще отриманих в результаті експерименту внаслідок наявних деформаційних пошкоджень зразка.

7. Отримані значення ЕПР рефлектора радіолокаційних сигналів типу ЛЛ відповідають повітряним цілям:

БпЛА “Зала” (zareєстровані значення ЕПР 0,04-0,09 м<sup>2</sup>);

БпЛА “Орлан” (zareєстровані значення ЕПР 0,03-0,3 м<sup>2</sup>);

БпЛА “Суперкам” (zareєстровані значення ЕПР 0,03-0,2 м<sup>2</sup>).

8. З урахуванням додаткового внеску елементів конструкції самого носія (БпЛА типу “Пародія”) характеристики радіолокаційної помітності зразка у цілому можуть відповідати БпЛА типу “Герань-1” (“Shahed-131”) та “Герань-2” (“Shahed-136”) (розрахункове значення ЕПР складає 0,1-0,7 м<sup>2</sup>).

9. Заходи протидії застосуванню противником хибних повітряних цілей:

врахування при ідентифікації повітряної цілі параметрів її руху (висота, швидкість);

комплексування радіолокаційної інформації з даними інших сенсорів (акустичних, оптичних);

додатково врахування при ідентифікації повітряної цілі сигнальної (енергетичної) інформації, а саме – порівняння ЕПР цілі для заданого ракурсу опромінення з ЕПР еталонного зразка.

10. Парне розташування ЛЛ під кутом орієнтовно 120° в різні боки забезпечує збільшення кутового діапазону підвищеного значення ЕПР, проте не впливає на його значення при опроміненні в одному напрямі.

### Висновки

Отже максимальні значення ЕПР лінз Лунеберга складають 0,02-0,06 м<sup>2</sup>, що для лінз такого розміру недостатньо високе значення.

Можливою причиною невисоких показників є незначні пошкодження лінз.

Отримані значення ЕПР рефлектора радіолокаційних сигналів типу лінзи Лунеберга відповідають наступним повітряним цілям: БпЛА “Зала” БпЛА, “Орлан”, БпЛА “Суперкам”.

З урахуванням додаткового внеску елементів конструкції самого носія (БпЛА типу “Пародія”) характеристики радіолокаційної помітності зразка у цілому можуть відповідати БпЛА типу “Шахед-131” (“Герань-1”) та “Шахед-136” (“Герань-2”), розрахункове значення ЕПР яких складає 0,1-0,7 м<sup>2</sup>.

За результатом проведеного аналізу, виходячи з конструктивних особливостей БпЛА можна стверджувати, що БпЛА “Пародія” може бути використаний для введення в оману системи ППО шляхом імітації хибної цілі та виснаження системи ППО.

Масове використання таких імітаторів змушує ППО перерозподіляти засоби для реагування на

широкий фронт атак. Це знижує щільність захисту на пріоритетних напрямках, створюючи умови для прориву справжніх ударних БпЛА чи ракет.

Для розпізнавання застосування противником хибних повітряних цілей необхідно:

при ідентифікації повітряної цілі враховувати параметри її руху (висота, швидкість);

здійснювати комплексування радіолокаційної інформації з даними інших сенсорів (акустичних, оптичних);

додатково врахувати при ідентифікації повітряної цілі сигнальну (енергетичну) інформацію, а саме – порівняння ЕПР цілі для заданого ракурсу опромінення з ЕПР еталонного зразка.

### Список використаних джерел

- [1.] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1964, <https://doi.org/10.1525/9780520328266>.
- [2.] D. Cenciotti, "These devices make stealth aircraft visible on radar screens," *The Aviation Geek Club*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://theaviationgeekclub.com/these-devices-make-stealth-aircraft-visible-on-radar-screens/>. [Дата звернення: 4 бер. 2026].
- [3.] S. Fuchs, G. von Freymann, and H. Wegener, "Luneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156–5161, 2011, doi: 10.1364/OE.19.005156.
- [4.] U. Leonhardt and T. G. Philbin, *Geometry and Light: The Science of Invisibility*. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2010.
- [5.] ТОВ "Радіонікс", "Експериментальні та теоретичні дослідження ЕПР лінз Лунеберга: технічний звіт," Київ, Україна, 2025.
- [6.] B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, and S. Rondineau, "Design optimization of multishell Luneburg lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 2, pp. 283–289, Feb. 2007, <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.889849>.
- [7.] W. E. Kock, "Metal-lens antennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 11, pp. 828–836, 1948, <https://doi.org/10.1063/1.1723441>.
- [8.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," preprint. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre\\_print\\_Dielectric\\_Lens\\_Antennas\\_v2.pdf](https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre_print_Dielectric_Lens_Antennas_v2.pdf). [Дата звернення: 4 бер. 2026].
- [9.] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, vol. 2. New York, NY, USA: Plenum Press, 1970, pp. 605–612.
- [10.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 3, pp. 13–24, Jun. 2005, <https://doi.org/10.1109/MAP.2005.148777>.
- [11.] H. Oraizi and A. Abdolali, "Design and optimization of spherical lens antennas including Luneburg lens," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 118, pp. 321–340, 2011, <https://doi.org/10.2528/PIER11081404>.

<sup>1</sup>Artem Kupchyn (PhD)  
<https://orcid.org/0000-0003-2013-691X>  
<sup>1</sup>Yurii Soloshenko (PhD)  
<https://orcid.org/0009-0002-9268-2813>  
<sup>2</sup>Volodymyr Koshka  
<https://orcid.org/0009-0007-7861-348X>  
<sup>3</sup>Serhii Lukianenko  
<https://orcid.org/0009-0002-5936-0476>

<sup>1</sup>Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<sup>2</sup>National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<sup>3</sup>Faculty of retraining and advanced training of aviation personnel of the Ivan Kozhedub National Air Force University, Mykolaiv, Ukraine

## INVESTIGATION OF THE RADAR CROSS SECTION OF LUNEBURG LENSES INSTALLED ON THE PARODIYA-TYPE UAV

The article presents the results of a theoretical and experimental investigation of the radar cross section (RCS) of Luneburg lenses installed on Russian Parodiya-type unmanned aerial vehicles in the 8–12 GHz frequency range. Numerical modeling of multilayer structures was performed using CST Microwave Studio, and laboratory measurements were conducted in an anechoic chamber employing two RCS evaluation methods. The angular and frequency dependencies of the reflected signal were determined, discrepancies between theoretical and experimental results were identified, and the feasibility of using the lenses as passive radar reflectors for false aerial target simulation was assessed.

The results of this study are of interest to researchers and engineers in the field of radar, as well as to air defense specialists for developing and improving methods of countering false aerial targets.

**Keywords:** Luneburg lens, radar cross section, false aerial target, radar reflector, unmanned aerial vehicles.

### References

- [1.] R. K. Luneburg, *Mathematical Theory of Optics*. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1964, <https://doi.org/10.1525/9780520328266>.
- [2.] D. Cenciotti, "These devices make stealth aircraft visible on radar screens," The Aviation Geek Club. [Online]. Available: <https://theaviationgeekclub.com/these-devices-make-stealth-aircraft-visible-on-radar-screens/>. [Accessed: Mar. 4, 2026].
- [3.] S. Fuchs, G. von Freymann, and H. Wegener, "Luneburg lens in silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 6, pp. 5156–5161, 2011, <https://doi.org/10.1364/OE.19.005156>.
- [4.] U. Leonhardt and T. G. Philbin, *Geometry and Light: The Science of Invisibility*. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2010.
- [5.] Radionix LLC, "Experimental and theoretical studies of RCS of Luneburg lenses: Technical report," Kyiv, Ukraine, 2025. (in Ukrainian)
- [6.] B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, and S. Rondineau, "Design optimization of multishell Luneburg lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 2, pp. 283–289, Feb. 2007, <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.889849>.
- [7.] W. E. Kock, "Metal-lens antennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 11, pp. 828–836, 1948, <https://doi.org/10.1063/1.1723441>.
- [8.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," preprint. [Online]. Available: [https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre\\_print\\_Dielectric\\_Lens\\_Antennas\\_v2.pdf](https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre_print_Dielectric_Lens_Antennas_v2.pdf). [Accessed: Mar. 4, 2026].
- [9.] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart, and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook*, vol. 2. New York, NY, USA: Plenum Press, 1970, pp. 605–612.
- [10.] J. R. Costa and C. A. Fernandes, "Dielectric lens antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 3, pp. 13–24, Jun. 2005, <https://doi.org/10.1109/MAP.2005.148777>.
- [11.] H. Oraizi and A. Abdolali, "Design and optimization of spherical lens antennas including Luneburg lens," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 118, pp. 321–340, 2011, <https://doi.org/10.2528/PIER11081404>.

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-92-96

УДК 623.746.7:519.6

<sup>1</sup>Миронюк Микола Юрійович (кандидат військових наук, старший дослідник)<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700><sup>1</sup>Салій Анатолій Григорович (кандидат військових наук, професор)<https://orcid.org/0000-0002-3491-9301><sup>2</sup>Барабаш Олег Володимирович (доктор технічних наук, професор)<https://orcid.org/0000-0003-1715-0761><sup>2</sup>Макарчук Андрій Валентинович<https://orcid.org/0000-0002-6422-7488><sup>1</sup>Національний університет оборони України, Київ, Україна<sup>2</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 17.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 07.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ФУНКЦІЇ КЕРУВАННЯ ПІД ЧАС КОРИГУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МАТЕМАТИКИ

У статті розглянуто задачу корегування (згладжування) траєкторії руху ударного безпілотного літального апарата (перехоплювача) з метою зменшення впливу зовнішніх факторів, зокрема вітру, перешкод, маневрування цілей та помилок оператора. Для розв'язання цієї задачі застосовано метод коригування траєкторії безпілотного літального апарата, оснований на математичній оцінці функції керування із використанням методів обчислювальної математики.

Розроблений метод дозволяє формувати керуючі впливи без необхідності аналітичного визначення закону керування, що є важливим для складних динамічних систем які працюють в бойових умовах. За результатами розрахунків показано, що використання отриманого наближення функції керування забезпечує ефективне наближення реальної траєкторії руху безпілотного літального апарата до заданої.

Отримані результати підтверджують можливість застосування запропонованого методу для підвищення точності наведення та ефективності виконання бойових (спеціальних) завдань, зокрема в умовах впливу зовнішніх факторів.

Результати дослідження можуть бути корисними для науковців і фахівців у галузі безпілотних авіаційних систем, розробників систем керування та наведення безпілотного літального апарата.

**Ключові слова:** функція керування, безпілотний літальний апарат, обчислювальні методи, бойове застосування, траєкторія польоту.

### Вступ

На сьогодні застосування БПЛА є доволі ефективним методом вирішення ряду задач, особливо це актуально у військовій сфері [1-3]. Однак, їх застосування часто супроводжується необхідністю вирішення ряду науково-технічних задач [7, 8] або їх підзадач. Однією з найпоширеніших підзадач в таких задачах є розрахунок реальної траєкторії руху БПЛА та бажаної [9-11] для виконання бойового (спеціального) завдання (вогневого впливу, ураження повітряних цілей, повітряна розвідка, доставлення матеріально-технічних засобів тощо) [3]. Для цього прийнято вводити так звану функцію керування [12], яка б дозволяла наблизити реальну траєкторію руху БПЛА до потрібної в конкретній бойовій задачі.

Аналітичне встановлення потрібної функції керування може бути складним, а то й узагалі

невирішуваним завданням у розглядуваній задачі. На основі цього виникає логічне завдання про побудову оцінки функції керування за допомогою засобів обчислювальної математики.

Метою статті є розроблення методу оцінювання функції керування БПЛА з використанням методів обчислювальної математики для забезпечення наближення його реальної траєкторії руху до заданої в умовах впливу зовнішніх факторів (погодних умов, геологічних аномалій тощо).

### Матеріали та методи

Нехай траєкторія руху БПЛА може бути описана за допомогою наступної граничної задачі:

$$\begin{aligned} \ddot{r}(t) &= A\dot{r}(t) + Br(t) + f(t) + g(t), \\ r(0) = r_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, r(T) = r_T = \begin{bmatrix} r_{Tx} \\ r_{Ty} \\ r_{Tz} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $A$  та  $B$  – це сталі матриці розмірністю  $3 \times 3$ ;  
 $f(t)$  – це відома функція зовнішнього впливу (погодних умов, геологічних аномалій тощо) на БПЛА;  
 $g(t)$  – це шукана функція керування розглядуваним БПЛА.

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_x(t) \\ f_y(t) \\ f_z(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$g(t) = \begin{bmatrix} g_x(t) \\ g_y(t) \\ g_z(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Зазначена функція керування  $g(t)$  має бути такою, що траєкторія руху  $r = r(t)$  повинна мінімально відрізнятись від наперед заданої траєкторії руху  $\varphi(t)$ .

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_x(t) \\ \varphi_y(t) \\ \varphi_z(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Розв'язком рівняння (1) є траєкторія руху БПЛА  $r = r(t)$ . Постановка завдання полягає в необхідності побудови наближення функції  $g(t)$  на проміжку часу  $[0; T]$  при відомих матрицях  $A$ ,  $B$ , функції зовнішнього впливу  $f(t)$ , заданої траєкторії руху  $\varphi(t)$  та параметрів траєкторії  $r_T$  в момент часу  $T$ .

Для обчислення функції керування  $g(t)$  можливо використовувати методи чисельного розв'язання граничних задач виду:

$$u''(t) + au'(t) + bu(t) + v(t) = 0, u(0) = u, u(T) = u.$$

Замінімо рівняння (1) на аналогічну йому систему різницевих рівнянь виду:

$$r(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, r(T) = \begin{bmatrix} r_{T_x} \\ r_{T_y} \\ r_{T_z} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{n^2}{T^2} r \left( \frac{(k+1)T}{n} \right) + \frac{n}{T} A r \left( \frac{(k-1)T}{n} \right) - f \left( \frac{kT}{n} \right) = \\ = \frac{n}{T} A \left( r \left( \frac{kT}{n} \right) \right) + B r \left( \frac{kT}{n} \right) + \\ + f \left( \frac{kT}{n} \right) + g \left( \frac{kT}{n} \right), k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (6)$$

Або, що те саме:

$$\begin{aligned} \frac{n^2}{T^2} \left( r \left( \frac{(k+1)T}{n} \right) - 2r \left( \frac{kT}{n} \right) + r \left( \frac{(k-1)T}{n} \right) \right) + \\ + \left( -2 \frac{n^2}{T^2} E_3 - \frac{n}{T} A - B \right) r \left( \frac{kT}{n} \right) = g \left( \frac{kT}{n} \right), \\ k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (7)$$

Тепер припустимо, що є гранична задача виду:

$$\begin{aligned} \dot{r}(t) &= Ar(t) + Br(t) + f(t), \\ r(0) &= r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, r(T) = r = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

розв'язок якої позначимо за  $\tilde{r}(t)$ . Даний розв'язок буде описувати реальну траєкторію руху розглядуваного БПЛА без керування. Тепер, якщо в (7) замінити  $r(t)$  на  $\tilde{r}(t)$ , то отримаємо наближення функції керування  $g(t)$  в точках  $\frac{kT}{n}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n-1$ , яке обчислюватиметься за формулою:

$$\begin{aligned} g \left( \frac{kT}{n} \right) &= \frac{n^2}{T^2} \tilde{r} \left( \frac{(k+1)T}{n} \right) + \frac{n}{T} A \tilde{r} \left( \frac{(k-1)T}{n} \right) - \\ &- f \left( \frac{kT}{n} \right) + \tilde{r} \left( -2 \frac{n^2}{T^2} E_3 - \frac{n}{T} A - B \right) \left( \frac{kT}{n} \right), \\ &k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (9)$$

Разом із тим, для обчислення значення функції керування  $g(t)$  на краях проміжку часу  $[0; T]$ , можливо скористатися наступними співвідношеннями  $g(0) = r - \varphi(0)$ ,  $g(T) = r - \varphi(T)$ .

Звідси ми маємо співвідношення для оцінки значень функції керування  $g(t)$  в моменти часу  $\frac{kT}{n}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ :

$$\begin{aligned} g(0) &= r - \tilde{r}(0), \quad g(T) = r - \tilde{r}(T), \\ g \left( \frac{kT}{n} \right) &= \frac{n}{T} \tilde{r} \left( \frac{(k+1)T}{n} \right) + \frac{n}{T} A \tilde{r} \left( \frac{(k-1)T}{n} \right) - \\ &- f \left( \frac{kT}{n} \right) + \tilde{r} \left( -2 \frac{n}{T} E - \frac{n}{T} A - B \right) \left( \frac{kT}{n} \right), \\ &k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (10)$$

Як свідчать результати спостереження за використанням (10), цей набір формул має проблему, поширену для деяких інтерполяційних аналогів операторів, породжених лінійним підсумовуванням рядів Фур'є, а саме необхідність у введенні вагового множника, в даному випадку,  $\frac{1}{n^2}$ . Таким чином, (10) може бути представлено наступним чином:

$$\begin{aligned} g(0) &= r_0 - \tilde{r}(0), \quad g(T) = r_T - \tilde{r}(T), \\ g \left( \frac{kT}{n} \right) &= \frac{1}{T^2} \tilde{r} \left( \frac{(k+1)T}{n} \right) + \frac{1}{nT} A \tilde{r} \left( \frac{(k-1)T}{n} \right) - \\ &- \frac{1}{n^2} f \left( \frac{kT}{n} \right) + \left( -2 \frac{n}{T^2} E_3 - \frac{1}{nT} A - \frac{1}{n^2} B \right) \tilde{r} \left( \frac{kT}{n} \right), \\ &k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (11)$$

Тепер виникає питання про те, як за допомогою (11) можливо отримати наближення функції  $g(t)$  у вигляді функції часу. Для цього розглянемо кожен з компонентів даної функції, а саме  $g_x(t)$ ,  $g_y(t)$ ,  $g_z(t)$ , окремо. В даному випадку матимемо три функції часу, значення яких в моменти часу  $\frac{kT}{n}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$  відомі. Тоді для наближення функцій можливо скористатися інтерполяційними аналогами операторів Абеля-Пуассона [13, 14].

$$\tilde{P}_{n,\rho}(f, t) = \frac{1 - \rho^2}{n + 1} \sum_{k=0}^n \frac{f \left( \frac{kT}{n} \right)}{1 - 2\rho \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{kT}{n} \right) + \rho^2} \quad (12)$$

Таким чином, функцію керування  $g(t)$  можливо наблизити, припустивши, що:

$$g(t) = \begin{bmatrix} \tilde{P}(g, t) \\ \tilde{P}(g, t) \\ \tilde{P}(g, t) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Перейдемо до практичного застосування даного набору формул.

### Результати

Розглянемо випадок, коли траєкторію руху БпЛА можливо описати наступною граничною задачею:

$$\begin{aligned} \dot{r}(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & -1 & 0 \\ -4 & 7 & 9 \end{bmatrix} \dot{r}(t) + \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & -1 & 0 \\ -4 & 7 & 9 \end{bmatrix} r(t) + \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \sin 4\pi t \\ -\frac{1}{3} \cos 6\pi t \\ \frac{1}{4} \sin 8\pi t - \frac{1}{5} \cos 10\pi t \end{bmatrix} + g(t), \quad (14) \\ r(0) = r_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, r(1) = r_1 = \begin{bmatrix} 10 \\ 11 \\ 9 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

а бажана траєкторія руху розглядуваного БпЛА описується функцією:

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} 10t \\ 11t \\ 9t(2-t) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Для початку порівняємо бажану траєкторію руху розглядуваного БпЛА та ту, яка була би без необхідного керування.

На рис. 1 очевидно, що корегування траєкторії розглядуваного БпЛА у вигляді керування є критично необхідним. Для того, щоб оцінити функцію керування розглядуваним БпЛА, необхідно скористатися співвідношеннями (12), (13)

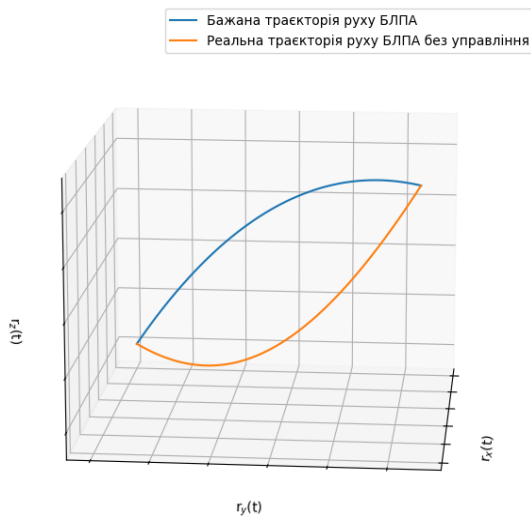


Рисунок 1 – Порівняння реальної траєкторії БпЛА без керування та бажаної траєкторії

припустивши, для прикладу, що  $r=0,75$  та  $n=100$ . В результаті, додавши отримане наближення функції керування, отримаємо наступне:

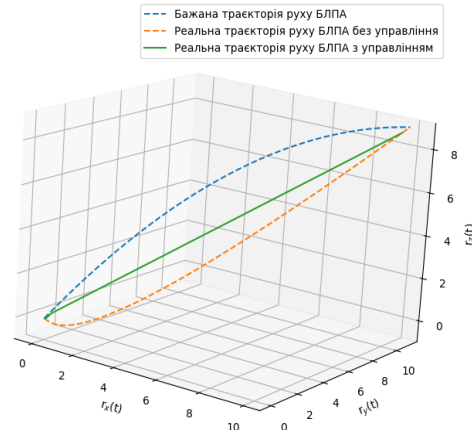


Рисунок 2 – Траєкторія руху розглядуваного БпЛА з урахуванням наближення функції керування за допомогою (12), (13)

Як видно з рис. 2, використовуючи наближення функції керування  $g(t)$  за допомогою (12), (13), можливо дійсно досягнути наближення траєкторії руху БпЛА до бажаної. Той факт, що на рис. 2 спостерігається не ідеальне накладання отриманої траєкторії руху БпЛА на бажану, може пояснюватися тим, що (12), (13) будують лише оцінку функції керування, а не реконструюють її аналітично. Однак, такої оцінки достатньо для того, щоб значно скорегувати траєкторію руху БпЛА.

### Обговорення

Отримані результати підтверджують можливість застосування чисельних методів для оцінювання функції керування БпЛА в задачах коригування траєкторії руху. Використання дискретизації граничної задачі та подальшого відновлення функції керування за допомогою інтерполяційних операторів дозволяє сформулювати керуючий вплив без необхідності аналітичного розв'язання, що є суттєвою перевагою для складних динамічних систем.

Встановлено, що запропонований підхід забезпечує наближення реальної траєкторії руху БпЛА до заданої, однак точність такого наближення залежить від обраного кроку дискретизації, параметрів інтерполяції та характеру зовнішніх збурень. Наявність відхилення між бажаною та отриманою траєкторіями пояснюється тим, що функція керування визначається у вигляді оцінки, а не точного аналітичного розв'язку.

Порівняно з класичними методами керування, такими як пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори або методи оптимального керування, запропонований підхід не потребує явного задання закону керування у замкненому вигляді, що спрощує його застосування в умовах невизначеності моделі або змінних зовнішніх впливів. Водночас, на відміну від оптимальних методів, він не гарантує досягнення глобального оптимуму, а забезпечує лише наближене рішення.

До обмежень запропонованого методу слід віднести відсутність урахування обмежень на керуючі впливи, динамічних характеристик реальних виконавчих органів БпЛА, а також чутливість до похибок вимірювання параметрів руху. Крім того, метод не враховує можливі затримки в каналах управління та вплив шумів сенсорних систем.

### Висновки

У роботі розроблено метод оцінювання функції керування БпЛА з використанням методів обчислювальної математики для випадку, коли його рух може бути описаний відповідною граничною задачею. Використання підходів, стандартних для чисельного розв'язання граничних задач, в поєднанні з методами наближення в аналізі Фур'є дало можливість показати, що наближення функції керування може бути реалізовано за допомогою наведених виразів.

За результатами розрахунків встановлено, що використання запропонованого методу забезпечує ефективне наближення реальної траєкторії руху БпЛА до заданої.

Показано, що запропонований підхід забезпечує можливість формування керуючих впливів в умовах невизначеності параметрів зовнішнього середовища (впливу погодних умов, перешкод, маневрування цілей, помилки оператора), що дозволяє згладити траєкторію руху БпЛА, тим самим підвищити точність його наведення.

Запропонований метод може бути використаний як основа для створення алгоритмів управління і наведення ударних БпЛА або БпЛА-перехоплювачів, здатних забезпечувати адаптивне коригування траєкторії руху в режимі реального часу, у тому числі в умовах обмеженого інформаційного забезпечення.

Практичне значення отриманих результатів полягає в підвищенні ефективності застосування безпілотних літальних апаратів за рахунок можливості коригування траєкторії їх руху в умовах протидії, невизначеності зовнішнього середовища та впливу збурень. Запропонований метод може бути використаний при створенні та вдосконаленні систем управління і наведення БпЛА, зокрема при виконанні різного роду бойових (спеціальних) завдань.

### Список використаних джерел

- [1.] "Analytical assessment of trends and features of the evolution of unmanned aerial vehicles in the russian-ukrainian war," *Modern Inf. Secur.*, т. 64, № 4, с. 171–180, 2025, <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.041219>.
- [2.] А. О. Корягіна та Н. М. Обушенко, "Розвиток та використання технологій БпЛА в службово-бойовій діяльності сил сектору безпеки та оборони України," у *Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Верховенство права: доктрина і практика в умовах сучас. світ. викликів*, м. Дніпро, Україна, 23 трав. 2025, с. 373.
- [3.] В. Пурнак, І. Мартинов та В. Солоненко, "Основні тенденції застосування сучасного озброєння та військової техніки суб'єктами сектору безпеки та оборони під час виконання службово-бойових (бойових) завдань," *Зб. наук. пр. Нац. акад. Держ. прикордон. служби України*. Серія: Військ. та техн. науки, т. 99, № 2, с. 52–59, серп. 2025, <https://doi.org/10.32453/3.v99i2.1877>.
- [4.] V. Pichkur, V. Sobchuk, O. Laptiev, D. Cherniy, V. Matvienko та J. Fedorenko, "The adaptive correction of angular velocities of an unmanned aerial vehicle based on discrete measurements of orientation," in *Proc. 7th Int. Conf. Methods Syst. Navig. Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 91–95, <https://doi.org/10.1109/MSNMC61017.2023.10329226>.
- [5.] V. Sobchuk, I. Kal'chuk, G. Kharkevych, O. Laptiev, Y. Kharkevych та A. Makarchuk, "Solving the problem of convergence of the results of analog signals conversion in the process of aircraft control," in *Proc. 6th Int. Conf. Actual Problems Unmanned Aerial Vehicles Dev. (APUAVD)*, 2021, pp. 29–32, <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615437>.
- [6.] В. Костенко, "Аналіз методів та алгоритмів планування траєкторій для групового застосування БпЛА," *Measuring Comput. Devices Technol. Processes*, № 3, с. 343–350, серп. 2025, <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-42>.
- [7.] В. Журід, В. Тягній, І. Васін та Р. Яковлев, "Планування та виконання польотів БпЛА в умовах змінного операційного середовища," *Повітр. міщ України*, т. 2, № 9, с. 133–144, груд. 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-133-144>.
- [8.] А. О. Nyzhnyk та А. І. Partyka, "Development of the concept of a UAV detection and neutralization system using interceptor drones," *Comput. Syst. Netw.*, т. 7, № 1, с. 235–246, черв. 2025, <https://doi.org/10.23939/csn2025.01.235>.
- [9.] Доктрина "Безпілотні системи". м. Київ, Україна, 2 берез. 2026.
- [10.] A. A. Chikrii, *Conflict-Controlled Processes*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1997, <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1135-7>.
- [11.] A. Makarchuk, I. Kal'chuk, Y. Kharkevych та G. Kharkevych, "Application of trigonometric interpolation polynomials to signal processing," in *Proc. 4th Int. Conf. Adv. Trends Inf. Theory (ATIT)*, 2022, pp. 156–159, <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024182>.
- [12.] O. Barabash, A. Musienko, A. Makarchuk, I. Salanda, D. Obidin та O. Pliin, "Abel-Poisson partial sums in signal theory," in *Proc. 6th Int. Congr. Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2024, <https://doi.org/10.1109/HORA61326.2024.10550475>.

<sup>1</sup>Mykola Myroniuk (Candidate of Military Sciences, Senior Researcher)

<https://orcid.org/0000-0002-7164-2700>

<sup>1</sup>Anatolii Sali (Candidate of Military Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-3491-9301>

<sup>2</sup>Oleh Barabash (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-1715-0761>

<sup>2</sup>Andriy Makarchuk

<https://orcid.org/0000-0002-6422-7488>

<sup>1</sup>National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

## EVALUATION OF THE CONTROL FUNCTION FOR UAV TRAJECTORY CORRECTION USING COMPUTATIONAL MATHEMATICS

The article addresses the problem of trajectory correction (smoothing) for strike and interceptor unmanned aerial vehicles (UAVs) in order to reduce the impact of external factors, including wind, disturbances, target maneuvering, and operator errors. To solve this problem, a UAV trajectory correction method based on the mathematical estimation of the control function using computational mathematics techniques is proposed.

The developed method makes it possible to generate control inputs without the need for an analytical determination of the control law, which is essential for complex dynamic systems operating in combat conditions. The results of the calculations demonstrate that the use of the obtained approximation of the control function ensures effective convergence of the actual UAV trajectory to the desired one.

The obtained results confirm the feasibility of applying the proposed method to improve guidance accuracy and the effectiveness of performing combat (special) missions, particularly under the influence of external factors.

The results of the study may be useful for researchers and specialists in the field of unmanned aerial systems, developers of UAV guidance and control systems.

**Keywords:** control function, unmanned aerial vehicle (UAV), computational methods, combat application, flight trajectory.

### References

- [1.] "Analytical assessment of trends and features of the evolution of unmanned aerial vehicles in the Russian-Ukrainian war," *Modern Inf. Secur.*, vol. 64, no. 4, pp. 171–180, 2025, <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.041219>.
- [2.] A. O. Koriahina and N. M. Obushenko, "Development and use of UAV technologies in the service and combat activities of the security and defense sector of Ukraine," in *Proc. Int. Sci. Pract. Conf. Rule of Law: Doctrine and Practice in the Context of Modern Global Challenges*, Dnipro, Ukraine, May 2025, p. 373. (in Ukrainian)
- [3.] V. Purnak, I. Martynov, and V. Solonenko, "Main trends in the use of modern weapons and military equipment by the subjects of the security and defense sector during the performance of service and combat (combat) tasks," *Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences*, vol. 99, no. 2, pp. 52–59, Aug. 2025, <https://doi.org/10.32453/3.v99i2.1877>. (in Ukrainian)
- [4.] V. Pichkur, V. Sobchuk, O. Laptiev, D. Cherniy, V. Matvienko, and J. Fedorenko, "The adaptive correction of angular velocities of an unmanned aerial vehicle based on discrete measurements of orientation," in *Proc. 7th Int. Conf. Methods Syst. Navig. Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 91–95, <https://doi.org/10.1109/MSNMC61017.2023.10329226>.
- [5.] V. Sobchuk, I. Kal'chuk, G. Kharkevych, O. Laptiev, Y. Kharkevych, and A. Makarchuk, "Solving the problem of convergence of the results of analog signals conversion in the process of aircraft control," in *Proc. 6th Int. Conf. Actual Problems Unmanned Aerial Vehicles Dev. (APUAVD)*, 2021, pp. 29–32, <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615437>.
- [6.] V. Kostenko, "Analysis of methods and algorithms of trajectory planning for group application of UAVs," *Measuring Comput. Devices Technol. Processes*, no. 3, pp. 343–350, Aug. 2025, <https://doi.org/10.31891/219-9365-2025-83-42>. (in Ukrainian)
- [7.] V. Zhurid, V. Tiahniy, I. Vasin, and R. Yakovliev, "Planning and execution of UAV flights in a changing operational environment," *Air Power of Ukraine*, vol. 2, no. 9, pp. 133–144, Dec. 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-133-144>. (in Ukrainian)
- [8.] A. O. Nyzhnyk and A. I. Partyka, "Development of the concept of a UAV detection and neutralization system using interceptor drones," *Comput. Syst. Netw.*, vol. 7, no. 1, pp. 235–246, Jun. 2025, <https://doi.org/10.23939/csn2025.01.235>.
- [9.] *Doctrine "Unmanned Systems"*. Kyiv, Ukraine, Mar. 2026. (in Ukrainian)
- [10.] A.A. Chikrii, *Conflict-Controlled Processes*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 1997, <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1135-7>.
- [11.] A. Makarchuk, I. Kal'chuk, Y. Kharkevych, and G. Kharkevych, "Application of trigonometric interpolation polynomials to signal processing," in *Proc. 4th Int. Conf. Adv. Trends Inf. Theory (ATIT)*, 2022, pp. 156–159, <https://doi.org/10.1109/ATIT58178.2022.10024182>.
- [12.] O. Barabash, A. Musienko, A. Makarchuk, I. Salanda, D. Obidin, and O. Ilin, "Abel-Poisson partial sums in signal theory," in *Proc. 6th Int. Congr. Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2024, <https://doi.org/10.1109/HORA61326.2024.10550475>.

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-97-106**

**УДК 623.746-519**

<sup>1</sup>Брега Дмитро Андрійович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-5134-4351>

<sup>1</sup>Бахін Василь Миколайович

<https://orcid.org/0009-0002-6774-3266>

<sup>2</sup>Шабанов Павло Павлович

<https://orcid.org/0000-0003-4297-5534>

<sup>1</sup>Гумений Андрій Михайлович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-1020-6304>

<sup>1</sup>Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

<sup>2</sup>Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 12.11.2025; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 06.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## ПОПЕРЕДНЄ КОМПОНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВИГЛЯДУ ЛЕГКОГО ДОЗВУКОВОГО БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ З РЕАКТИВНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ

У статті розглянуто сучасні тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів, зокрема літакового типу з реактивними силовими установками. Показано, що досвід бойових дій в Україні та світі підтверджує ключову роль безпілотників у військовій і цивільній сферах. Проведено аналіз переваг і обмежень використання двигунів внутрішнього згорання, електричних та реактивних установок, із виокремленням особливостей малих турбореактивних двигунів для одноразових ударних безпілотних апаратів. Здійснено попереднє проектування зразка реактивного безпілотного літального апарата із заданими тактико-технічними характеристиками, зокрема визначено масові параметри, геометрію крила та фюзеляжу, схему хвостового оперення, а також проведено розрахунок аеродинамічних характеристик за допомогою програмного комплексу Ansys Fluent. Отримані результати дали змогу побудувати поляру літального апарату та оцінити аеродинамічну ефективність у діапазоні дозвукових швидкостей. У статті обґрунтовано доцільність використання доступних малих турбореактивних двигунів серійного виробництва, зокрема Swiwin 300B, для створення оперативно-тактичних безпілотних літальних апаратів. Наведені розрахунки підтверджують можливість досягнення необхідної дальності, швидкості та корисного навантаження при збереженні простоти конструкції й відносно низької вартості. Отримані результати можуть бути використані у подальшому вдосконаленні методів розрахунку та оптимізації конструкції безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, реактивна силова установка, аеродинаміка, чисельне моделювання, турбореактивний двигун.

### Вступ

Досвід бойових дій в Україні показав, що безпілотні літальні апарати (БпЛА) відіграють провідну роль у сучасній війні. Останні роки характер сучасної війни істотно змінився. Швидкий розвиток мікроелектроніки, авіації, балістики, систем протиповітряної оборони дозволили змістити акценти ведення війни у бік застосування високоточних систем зброї та безпілотних літальних апаратів за підтримки розвідувальної інформації з космосу. Сьогодні для отримання розвідувальної інформації та прийняття правильних рішень кожна бойова структура від взводу та вище повинна мати розвідувальні безпілотники. Але не тільки завдання пов'язані з розвідкою здатні виконувати безпілотні системи, а й безпосередньо приймати участь у бойових діях. Тим паче, що відсутність людини-пілота на борту зменшує вірогідність втрати цінного спеціаліста і

розширює маневреність та коло задач, які можуть бути виконані літальним апаратом.

У задачі військового застосування БпЛА входять:

розвідка (візуальна, радіотехнічна, біологічна, радіаційна);

коригування вогню по супротивнику;

забезпечення зв'язку та ретрансляція сигналу на полі бою;

нанесення бойових ударів по об'єктам, техніці та живій силі супротивника, як з допомогою навісного озброєння, так і жертвуючи собою (у разі якщо це дрон-камікадзе);

Відповідно до цих завдань, кожен тип БпЛА, в залежності від свого призначення, має свої тактико-технічні характеристики. Попри це в більшості випадків критеріями вибору параметрів для БпЛА в першу чергу є дальність та тривалість польоту. Крім цільової функції апарат повинен виконувати

ряд необхідних операцій та відповідати деяким вимогам. Наприклад, необхідно забезпечувати можливість запуску і посадки апарату в різних умовах, можливість транспортування апарату та допоміжного обладнання. І відповідно з цими вимогами можуть бути накладені додаткові обмеження, що впливають на компоновку та конструктив апарата.

БпЛА літакового та коптерного типів мають різні технічні характеристики та підходять до виконання різних типів завдань. Літаковий тип БпЛА має більшу вантажопідйомність, можливу швидкість польоту та радіус дії, що дозволяє використовувати їх у якості засобів розвідки, моніторингу, картографії, доставки невеликих вантажів (до 50-100 кг) на досить великі відстані (до 2000 км), учбових цілей при навчанні розрахунків ППО, тощо. Коптерні БпЛА мають набагато кращу маневреність і можливість зависати на одному місці, але менший радіус дії та менше корисне навантаження, що робить їх чудовими літаючими машинами тактичного рівня, що використовуються для ближньої розвідки місцевості, пошуків постраждалих при проведенні рятувальних операцій, зв'язку між групами людей чи окремими людьми та доставки малих вантажів

(до 10 кг) безпосередньо до рук адресата. Тобто кожен тип БпЛА має свої переваги та тип завдань.

### Матеріали та методи

Дослідження спрямоване на визначення сучасної ніші реактивних БпЛА та оцінку актуальності їх створення. Аналіз новітніх джерел інформації вказує на недостатнє поширення такого типу апаратів. Це зумовлено не відсутністю завдань для їх застосування, а обмеженою кількістю практичних результатів розробок у цьому напрямку.

Використуючи дані подібних досліджень з відкритих джерел [1], [2], [3], а також результати розрахунків, отриманих методами чисельного моделювання, пропонується обґрунтувати доцільність створення недорогого безпілотної з реактивною силовою установкою (СУ) тактично-оперативного рівня. Концепція розробки базується на використанні авіамоделейних реактивних двигунів як доступної та відносно недорогої технологічної основи.

#### Сучасний стан розвитку

Розглянемо більш детально БпЛА літакового типу за типом двигуна. Вони бувають оснащені двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), електродвигунами різних типів та реактивними двигунами теж різних типів (прямоточний повітряно-реактивний двигун (ППРД), пульсуючий повітряно-реактивний двигун (ПуПРД), імпульсно-детонаційний двигун (ІДД), тощо).

Наразі створено і продовжують створюватися велика кількість БпЛА оснащених ДВЗ, так як такі силові установки мають невелику вартість і невеликі витрати палива, що дозволяє досягти великого радіусу дії при відносно невеликій масі палива на борту.

Багато прототипів та дрібносерійних БпЛА мають електричну силову установку, що є значно

тихіша за ДВЗ і дозволяє збільшити параметри непомітності ЛА, але має обмежений радіус дії БпЛА через досить високу вагу акумуляторів, яка з'їдає корисне навантаження апарату.

Менш розповсюджене створення БпЛА з реактивною СУ, так як реактивний двигун має більшу ціну і конструкція планеру є теж складнішою та має більшу вартість, через те, що реактивний двигун дозволяє досягти більш високих швидкостей. Тобто БпЛА з реактивною СУ здатні подолати маршрут значно швидше ніж інші типи безпілотної, отже зростає оперативність реагування та зменшується час обльоту ділянок великої площі. Якщо розглядати військову сферу застосування, то реактивні БпЛА являються більш помітними (шум двигуна, висока температура вихлопних газів, радіолокаційна помітність), але більша швидкість польоту призводить до зменшення часу підльоту до цілі, проміжку часу для реагування ворожих систем ППО, а також зменшення вірогідності знищення БпЛА стрілецьким або зенітним вогнепальним озброєнням, нівелює цей недолік, а невелика вартість (набагато менша за вартість ракети комплексу ППО) дозволить вести бій на виснаження систем ППО як у даній точці координат, так і в економічній площині у масштабі усієї країни [4], [5].

Відносно новим та цікавим напрямком військового дронобудування є створення недорогих одноразових БпЛА ударної дії, подібних до крилатої ракети, але ближнього радіусу дії та з меншим корисним навантаженням. Особливо перспективно у рішенні такої задачі виглядає використання малих ППРД (МППРД), що виготовляються для ринку авіамоделей, таких як Swiwin, JetCat, Kero Start, King Tech, PBS та інші. Такі двигуни, в залежності від моделі, видають тягу від 3 до 110 кгс, але мають малий міжремонтний ресурс – близько 25 годин нальоту. Невелика, у порівнянні з комерційними моделями двигунів малої потужності, ціна робить їх досить привабливими до використання у проектуванні БпЛА одноразової дії.

Ніша реактивних БпЛА в Україні доволі обмежена. Розроблені дрони UJ-23 Тораз (Рис.1а) та Bullet (Рис 1б), але вони мають низьке корисне навантаження і більше придатні для роботи у якості розвідників або тренувальних цілей. Також нещодавно з'явилися дрони Dart250EW (Рис.1в) та "Пекло"(Рис.1г), усі їх тактико-технічні характеристики (ТТХ) точно невідомі. Але, по заявам виробника, максимальна швидкість Dart250EW знаходиться у межах 350-400км/год. Судячи з зовнішнього вигляду дрон "Пекло" має кріплення до пілону крила, тобто запуск його відбувається за допомогою штурмової авіації на транс- та надзвукових швидкостях. БпЛА з системою наземного запуску, які б мали високу швидкість (600-800 км/год), середній радіус дії та достатнє корисне навантаження поки що не створено. У світі, ця ніша теж поки ще не повністю зайнята, адже аналоги які існують у більшості своїй

є більш важкими, та оснащеними більш потужними двигунами понад 100кгс тяги. Тобто проектування БпЛА такого класу потребує чітких та досконалих методів проектування, а тим паче розрахунку аеродинамічних характеристик БпЛА.



а)



б)



в)



г)

**Рисунок 1.** – Реактивні БпЛА української розробки

Традиційне проектування БпЛА опирається на адекватні функціональні математичні моделі, які враховують вплив серії факторів на аеродинаміку, міцність конструкції, точність керування та експлуатаційну ефективність. Інтуїтивно-емпіричний підхід опирається на рівень знань та досвіду учасників проектування і допомагає серед множини аналогів технічних рішень обрати раціональні варіанти або продовжити обґрунтований пошук технічних ідей. Відсутність

уніфікованого науково обґрунтованого підходу до проектування БпЛА на основі методів оптимізації суттєво погіршує ситуацію.

#### *Аналіз останніх досліджень і публікацій*

Останні передвоєнні та воєнні роки характеризуються широкою активізацією розробок у сфері безпілотних літальних апаратів. Створенням БпЛА займаються державні та приватні інституції, конструкторські бюро та одиночки, професіонали та аматори. Публікації останніх років [1], [2], [6] показують, що ця тема, в тому числі і БпЛА з реактивною силовою установкою, активно опрацьовується різноманітними колективами і нові моделі періодично з'являються, хоч і в значно меншій кількості ніж більш розповсюджені БпЛА з ДВЗ або коптерного типу.

#### *Основні тактико-технічні характеристики БпЛА*

Основна задача полягає у створенні дешевого ударного БпЛА, здатного досягти ближнього тилу супротивника, для ударів по штабам, складам, скупченням техніки та особового складу, а також транспортним вузлам. Легкого та компактного, здатного до старту з легкого мобільного шасі типу «пікап» (або легкого причепу до нього) або більш важкого типу «вантажний автомобіль» з змонтованою у кузові системою комірок з направляючими для запуску до 10 БпЛА.

Сформулюємо основні вимоги до ТТХ ЛА:

Маса корисного навантаження бойової частини -  $M_{\text{кв}} = 50\text{кг}$ .

Максимальна дальність польоту -  $L_{\text{max}} \geq 200\text{ км}$ .

Максимальна швидкість польоту БпЛА -

$$V_{\text{max}} = 734 - 850 \text{ км/год } (0,6 - 0,7M).$$

Старт - наземний з використанням розгінного твердопаливного двигуна.

Швидкість розгону БпЛА твердопаливним двигуном при старті -  $V_{\text{ст}} = 80 \text{ м/с } (0,235M)$ .

Габаритні розміри - розмах крила до 1м, довжина фюзеляжу - 2..3 метри.

#### **Результати**

На основі висунутих до характеристик літального апарату вимог, проводимо компонування та формуємо попередній вигляд ЛА. Літальний апарат нормальної схеми, статично врівноважений. Фюзеляж - циліндричний великого подовження, як найпростіший та найдешевший у виготовленні, з малим коефіцієнтом лобового опору. Виходячи з масово-габаритних характеристик цільового навантаження та обладнання, що планується до встановлення на БпЛА приймаємо зовнішній діаметр фюзеляжу  $D_{\text{ф}} = 0,225\text{м}$ , довжина фюзеляжу попередньо  $L_{\text{ф}} = 2,400\text{м}$  (у подальшому буде скоригована в залежності від габаритів підбраного двигуна та форми повітрязабірника). На рис. 2 представлено попереднє компонування ЛА.

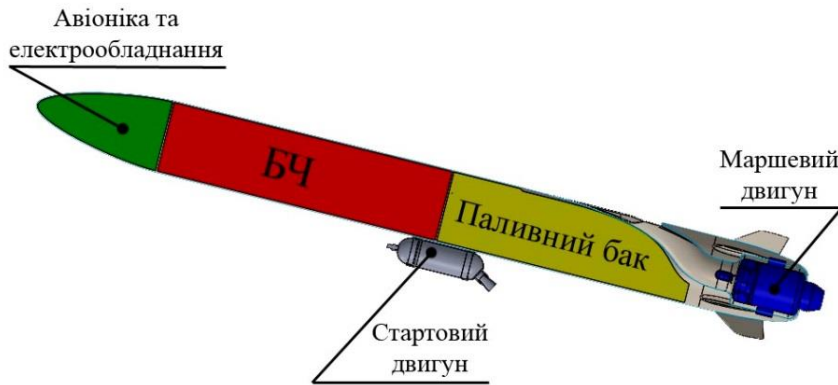


Рисунок 2. – Компонування внутрішніх відків БпЛА

Для визначення маси БпЛА у першому та другому наближеннях користуємося статистичними даними відносних мас частин ЛА керуючись роботами Eugene-L.Fleeman [7], S.S.Chin [8], Raad Karim Kadem [9], а також інших авторів [10].

Маса ЛА у першому наближенні визначається за формулою (1):

$$M_{01} = (M_{кв} + M_{п} + M_{cy}) \times 1,8 = (50 + 20 + 4) \times 1,8 = 133,2 \text{ кг} \quad (1)$$

де  $M_{кв}$  – маса корисного навантаження;  
 $M_{п}$  – маса палива;  
 $M_{cy}$  – маса силової установки.

З попереднього огляду МППРД до 50кгс тяги призначаємо суху масу силової установки у межах до  $M_{cy} = 4\text{кг}$ .

У другому наближенні визначаємо більш точне значення маси літального апарату, використовуючи значення відносних мас більш дрібних частин ЛА та відомі маси компонентів. Попередньо маса необхідного палива, щоб забезпечити заявлену дальність польоту розраховується із припущення що витрата палива двигуном становить максимум 1л/хв. Час підльоту на максимальній швидкості  $V_{max} = 734 \text{ км/год}$  можна визначити за формулою (2):

$$T = \left( \frac{L_{max}}{V_{max}} \right) \times 60 = \left( \frac{200}{734} \right) \times 60 = 16,35 \text{ хв} \quad (2)$$

де  $L_{max}$  – максимальна дальність польоту;  
 $V_{max}$  – максимальна швидкість польоту.

З урахуванням часу розгону зі стартової ( $V_{ст} = 80\text{м/с}$ ) до максимальної швидкості, щоб досягти радіусу дії 200км знадобиться орієнтовно 24л керосину -  $M_{п} = 20\text{кг}$ .

У другому наближенні злітна маса:

$$M_{02} = M_{кв} + M_{п} + M_{cy} + M_{кр} + M_{ф} + M_{пб} + M_{ел} + M_{го/во} \quad (3)$$

де  $M_{кр}$  – відносна маса крила;  
 $M_{ф}$  – відносна маса фюзеляжу;  
 $M_{пб}$  – відносна маса паливного баку та його систем;  
 $M_{ел}$  – маса електричного обладнання;

$M_{го/во}$  – відносна маса рулів висоти та напрямку.

Відносна маса крила –  $M_{кр} = 0,1M_{01}$   
 Відносна маса фюзеляжу –  $M_{ф} = 0,2M_{01}$   
 Відносна маса паливного баку та його систем –  $M_{пб} = 0,05M_{01}$   
 Відносна маса рулів висоти та напрямку –  $M_{го/во} = 0,02M_{01}$   
 Орієнтовна маса силової установки –  $M_{cy} = 4 \text{ кг}$   
 Орієнтовна маса електричного обладнання –  $M_{ел} = 5 \text{ кг}$   
 Орієнтовна маса палива –  $M_{п} = 20 \text{ кг}$ .

$$M_{02} = 128,284 \text{ кг}$$

Тобто відносно відхилення злітної маси ЛА у другому наближенні становить 3,7%, що є менше допустимих 5%. Округляємо до більшого числа та приймаємо  $M_{зл} = 130\text{кг}$ .

Далі обирається профіль крила. За результатами аналізу альбомів аеродинамічних профілів та їх характеристик, були порівняні наступні профілі: NYU/Grumman K-1, Eppleg E423, Wortmann FX 76-MP-120, Selig S1210 (Рис. 3).

За результатами порівняльних розрахунків був обраний трансзвуковий аеродинамічний профіль NYU/Grumman K-1 (Рис.4), який має високу несучу здатність на швидкостях 0.7-0.8М. Профіль NYU/Grumman K-1 має відносну товщину 11,6 на 33% хорди, та відносну кривизну 1,9 на 75% хорди.

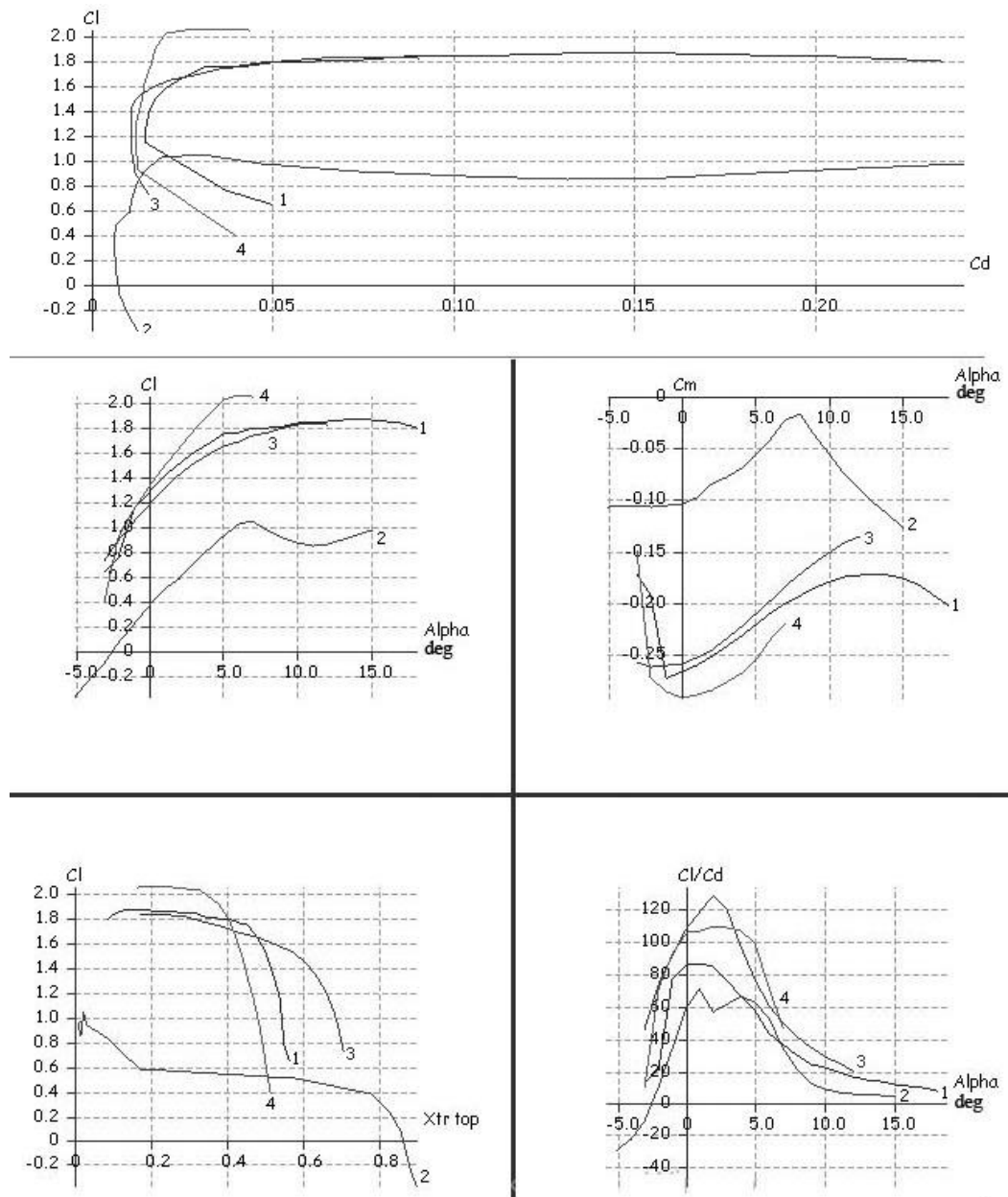
Наступним кроком є розрахунок геометричних параметрів крила. Використовуємо формулу (4) визначення мінімально необхідної площі крила:

$$S_{кр} = \frac{2M_{зл}g}{0,9C_{ymax}\rho V^2} \quad (4)$$

де  $M_{зл}$  – злітна маса ЛА,  
 $C_{ymax}$  – максимальний коефіцієнт підйомної сили,  
 $\rho$  – густина повітря,  
 $V$  – швидкість польоту ЛА

Розглянемо площу крила необхідну для горизонтального польоту ( $S_{кр_гп}$ ) та площу потрібну для виходу на політний режим ЛА після розгону ( $S_{кр_ст}$ ).

$$S_{кр_гп} = 0,213 \text{ м}^2 \quad S_{кр_ст} = 0,239 \text{ м}^2$$



E423  
1 — T1\_Re3.000\_M0.60\_N9.0

FX 76-MP-120  
2 — T1\_Re3.000\_M0.60\_N9.0

NYU/GRUMMAN K-1 AIRFOIL  
3 — T1\_Re3.000\_M0.60\_N9.0

S1210 12%  
4 — T1\_Re3.000\_M0.60\_N9.0

Рисунок 3. – Поляри аеродинамічних профілів

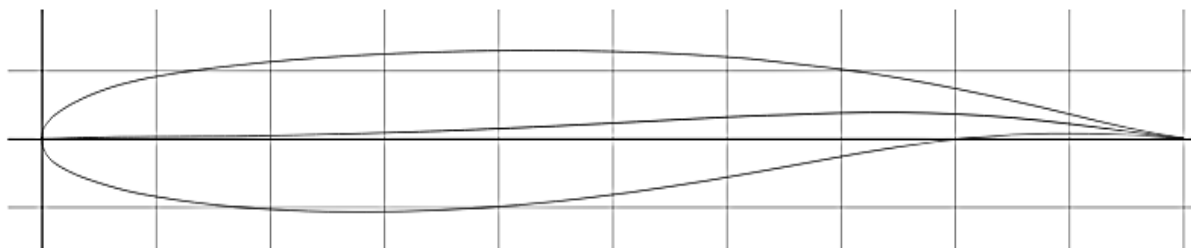


Рисунок 2. – Аеродинамічний профіль NYU/Grumman K-1

Максимальну з них приймаємо як необхідну нам площу крила для забезпечення польоту ЛА.

Визначаючи форму крила, зупинимось на трикутному крилі, через його компактність (що забезпечить більш зручне транспортування ЛА, менший час розгортання ЛА у бойове положення, а також можливість розміщення 2-3 одиниць на мобільній платформі типу пікап) та особливості роботи такого крила на біля звукових швидкостях.

Задаємо видовження  $\lambda$  та звуження  $\eta$  крила, керуючись роботами Eugene-L.Fleeman [7], S.S.Chin [8], Raad Karim Kadem [9], а також інших авторів [10].

$$\lambda = 3; \eta = 3;$$

Маючи значення видовження  $\lambda$  та звуження  $\eta$  крила, знаходимо розмах, а також характерні хорди крила:

$$\text{Розмах крила} - L_{\text{кр}} = 0.846\text{м}$$

$$\text{Середня аеродинамічна хорда (САХ)} - b_{\text{сах}} = 0,270\text{м}$$

$$\text{Коренева хорда} - b_{\text{к}} = 0,405\text{м}$$

$$\text{Кінцева хорда} - b_{\text{конц}} = 0,135\text{м}$$

Маючи ці значення, визначаємо кут стрілоподібності крила по лінії 1/4 хорд  $\chi = 26^\circ$

Визначаємо геометричні характеристики фюзеляжу:

Загальне подовження фюзеляжу знаходимо за формулою (5).

$$\lambda_{\phi} = \frac{L_{\phi}}{D_{\phi}} = \frac{2400}{225} = 10,667 \quad (5)$$

де  $D_{\phi} = 0,225\text{ м}$  – діаметр фюзеляжа

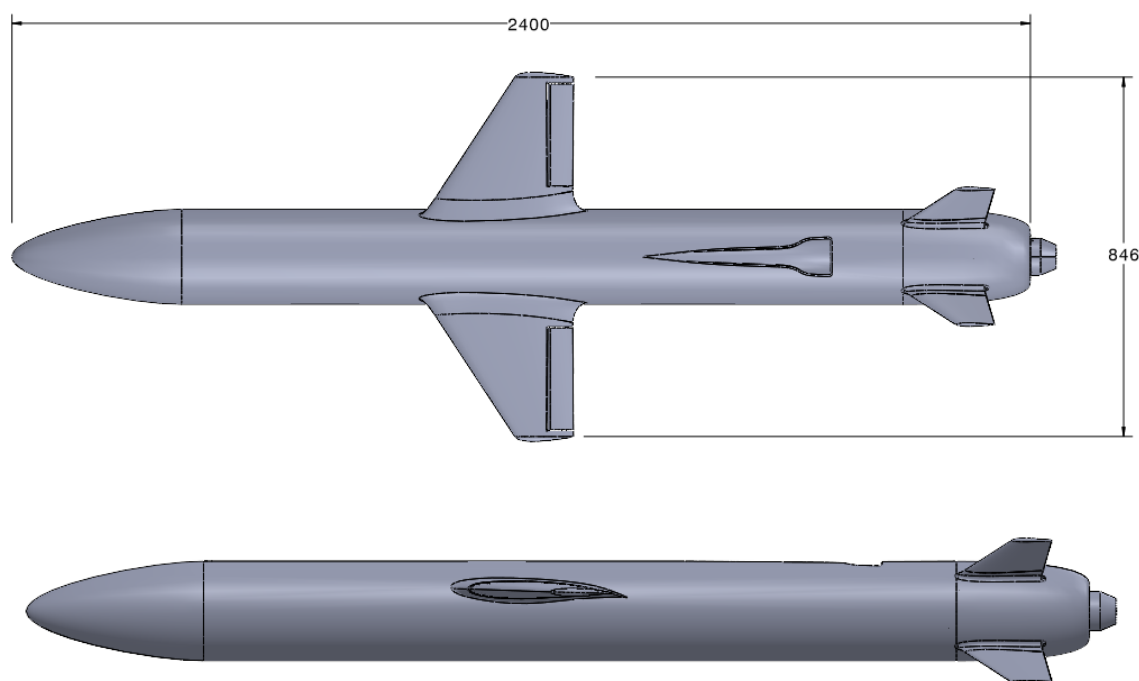
$L_{\phi} = 2,400\text{ м}$  – довжина фюзеляжа

Носовий обтікач оживальної форми, довжина  $L_{\text{нч}} = 400\text{мм}$ ,  $\lambda_{\text{нч}} = 1,78$ ,  $\eta_{\text{нч}} = 0,44$

Кормова частина оживальної форми, довжина  $L_{\text{корм}} = 400\text{мм}$ ,  $\lambda_{\text{корм}} = 1,78$ ,  $\eta_{\text{корм}} = 0,79$

Подовження циліндричної частини фюзеляжу  $\lambda_{\text{цч}} = 7,11$

Попередній зовнішній вигляд ЛА (Рис.5).



**Рисунок 5.** – Зовнішній вигляд ЛА

Положення крила по висоті фюзеляжу – середньоплан, з крилом піднятим над площиною симетрії на 50мм (плечове крило). Розташування крила над центром мас ЛА підвищує стійкість літака, що робить його більш простим в керуванні при сильному бічному вітрі та турбулентності, а розташування нижче верхнього краю фюзеляжу (як

у випадку класичного високоплану) дозволяє домогтись меншого опору при аеродинамічній інтерференції крила та фюзеляжу (середньоплан має найнижчий показник збільшення лобового опору при інтерференції фюзеляж-крило) (Рис.6).

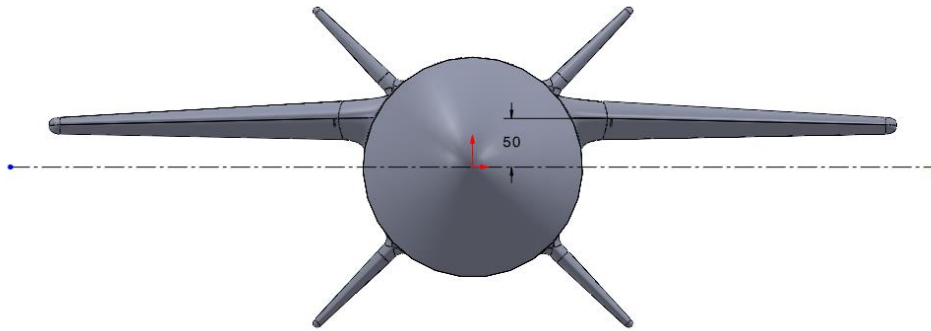


Рисунок 6. – Вигляд ЛА зпереду (розташування крила)

Вибір схеми хвостового оперення. Хвостові рулі цільно поворотні Х-подібної схеми. Х-подібне оперення є збалансованим і дозволяє уникати виникнення крутного моменту навколо поздовжньої осі ЛА, у той же час забезпечує стабільне керування по курсу та тангажу. На дозвукових швидкостях суцільно поворотне оперення (СПО) забезпечує значне покращення керованості та стійкості літака в порівнянні з традиційними системами, оскільки дозволяє поєднати функції стабілізатора та керма, підвищуючи аеродинамічну ефективність та дозволяючи виконувати маневри з меншим зусиллям. А відсутність окремих рулів, стабілізатора та механізмів їх управління дозволяє знизити вагу конструкції та спростити її, що позитивно впливає на загальну аеродинаміку та економічність літака. Також така схема розташування забезпечує зменшення впливу затінення оперення при великих кутах атаки, так як хоч б одна пара рулів залишається незатіненою в будь-якому випадку.

Визначаємо площу хвостового оперення.

Необхідна бокова площа одного руля  
 $S_p = 0,0127 \text{ м}^2$ ,  
 кут стрілоподібності руля по лінії 1/4 хорд  $\chi = 41^\circ$ .

### Обговорення

Визначивши геометрію крила, фюзеляжу та площини керування, за допомогою інструменту Ansys Fluent визначаємо аеродинамічні характеристики ЛА, тобто коефіцієнти підйомної сили  $C_y$  та лобового опору  $C_x$  в залежності від кута атаки, а також найвигідніший кут встановлення крила, що у нашому випадку дорівнює  $\alpha_\phi = 1,5^\circ$ . Маючи вищезгадані дані будуємо поляру ЛА, тобто графічну залежність  $C_y$  від  $C_x$  при різних кутах атаки ЛА (Рис.7 та Рис.8). Поляру будуємо для декількох значень швидкостей:

$V_{ст} = 80 \text{ м/с} = 0,235M$ ,  
 $V_{max1} = 204 \text{ м/с} = 0,6M$ ,  
 $V_{max2} = 221 \text{ м/с} = 0,65M$ ,  
 $V_{max3} = 238 \text{ м/с} = 0,7M$ .

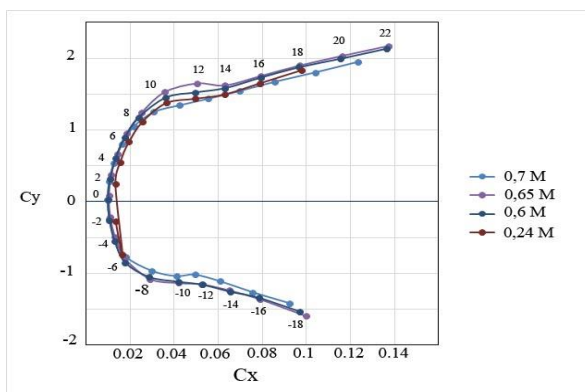


Рисунок 7. – Поляри ЛА на заданих швидкостях

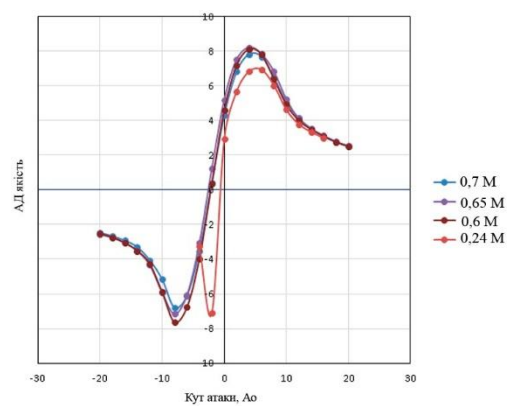


Рисунок 8. – Аеродинамічна якість ЛА на заданих швидкостях

Маючи максимальне значення коефіцієнту лобового опору  $C_{x_{max}}$  визначається максимальне значення сили лобового опору при горизонтальному польоті  $F_x = 263,48 \text{ Н}$ .

Маючи це значення підбираємо модель двигуна, що має значення тяги не менше ніж отримане значення сили лобового опору.

Розглянуто прямоточні мініатюрні ТРД тягою від 26 до 55 кгс. В табл. 1 наведено характеристики

основних ТРД, що виробляються нині серійно. Якщо порівнювати близькі по значенню тяги двигуни між собою, то можна зробити висновок, що вони мають схожі витратні та експлуатаційні характеристики. За відгуками авіамоделістів, які є кінцевими користувачами, на теперішній час деякі переваги мають наступні виробники: Hammer IQ; JetCat; PBS, відрізняючись від конкурентів кращою якістю та відповідно вищою ціною.

## Серійні малі турбореактивні двигуни. Порівняльні характеристики [1]

Модель	Країна	Максимальна тяга, кгс	Температура продуктів згорання, °С	Витрата палива при максимальному навантаженні, г/хв	Витрата продуктів згорання, кг/с	Мін/Макс оберти валу, тис. об./хв	Ціна	Примітка
KingTech K-260G4+	США	26.0	700	760	–	33/112	3 650.00 USD	Ресурс 25 годин
JetCat P300PRO	Німеччина	30.0	480 – 750	784(980 мл)	0.50	35/106	4 200.00 EUR (без ПДВ)	EGV – 2 160 км/год
SW300B	Китай	30.0	400 – 750	800 (при 90% навантаженні)	–	35/98	4 000.00 USD	Ресурс 25 годин
KINGTECH K320G4+	США	32.0	700	870	–	30/100	4 150.00 USD	Ресурс 25 годин
ТДЗ0	Росія	36.1	–	963	0.62	Макс. 59.2	–	Безперервна робота 2 години
AMT Netherlands Titangasturbine	Нідерланди	39.2	850	1020	0.66	Макс. 96	10 144.00 EUR (без ПДВ)	
PBS TJ40-G1	Чехія	39.5	–	968(0.147 кг/Н/год)	–	–		Ресурс 50 годин Максимальна швидкість 0.9М
JetCat P400-PRO-LN	Німеччина	39.7	480 – 750	1 040(1 300 мл)	0.67	30/98	7 913.22 EUR	EGV – 2 122 км/год
KingTech K-450G4+	США	45.0	760	1 100	–	25/90	5 950.00 USD	
JetCat P500PRO-GL	Німеччина	49.2	480 – 740	1 240(1 550 мл)	0.90	26/80	11 718.49 EUR (без ПДВ)	EGV – 1 986 км/год
				Тяга 50 – 150 кг				
JetCat P550-PRO-GL	Німеччина	55.0	480 – 750	1 320(1 650 мл)	0.93	26/83	145 80.00 EUR	EGV – 2 129 км/год

Аналіз досвіду використання таких двигунів в якості силової установки авіамоделей показує, що кожен з розглянутих двигунів, незалежно від виробника, є достатньо надійним для використання його в якості силової установки для ЛА, що розглядається у цій статті.

За результатами порівняння у якості СУ ЛА було обрано двигун Swiwin 300B виробництва КНР

(Рис.9). Вибір був зумовлений низькою ціною та доступністю даного двигуна на світовому ринку. А відгуки користувачів даної моделі двигуна дозволяють зробити висновок, що його надійності вистачає, а ресурс навіть перевищує необхідні 20 хвилин для використання його у якості СУ БпЛА-камікадзе [2]

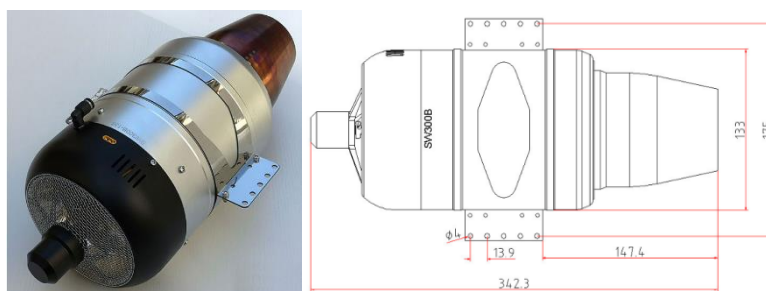


Рисунок 9. – Двигун Swiwin 300B

Двигун Swiwin 300B має наступні характеристики:

- тяга - 300 Н;
- кількість обертів - 38000 об/хв – 123000 об/хв;
- температура вихлопних газів - 400-750С/752-1382F;
- витрата палива - 0.83 л/хв;
- 90% отужності - 110000 об/хв
- паливо - гас, авіаційне пальне ТС-1 або дизельне паливо;
- вага - 2500 г (вага з системою подачі палива 2830г);
- діаметр – 133 мм;
- довжина - 342.3 мм;
- міжремонтний ресурс - 25 годин;

АКБ 3 - 4cell li-po;

### Висновки

Проведене дослідження підтверджує зростання значення БпЛА у військовій та цивільній сферах, особливо з огляду на сучасні виклики та бойовий досвід в Україні. Також аналіз показав, що використання реактивних силових установок у малорозмірних БпЛА відкриває нові можливості щодо швидкості, дальності та маневреності літальних апаратів. Попередні розрахунки масових та геометричних параметрів підтвердили можливість створення ефективного зразка БпЛА з відносно невеликими витратами. Розрахунок аеродинамічних характеристик у застосунку Ansys Fluent підтвердив достатню ефективність

запропонованої конфігурації. Серійні турбореактивні двигуни малого класу, зокрема Swiwin 300B, можуть бути економічно доцільними для застосування в одноразових ударних БПЛА. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію конструкції з урахуванням ефектів малих чисел Рейнольдса.

### Список використаних джерел

- [1.] А. А. Халатов, О. Ф. Немчін, Є. О. Шквар, А. В. Кузьмін та С. Г. Кобзар, Бойові малорозмірні безпілотні літальні апарати з реактивною тягою: монографія, А. А. Халатов, Ред. Дніпро, Україна, 2023.
- [2.] О. Е. Хрулев, "Аналіз можливості застосування комерційних мікротурбореактивних двигунів для високошвидкісних малорозмірних БПЛА оперативного-тактичного рівня," *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, № 4, спецвипуск 2(190), с. 5–18, 2023, <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4sup2.01>.
- [3.] Ю. П. Сальник та І. В. Матала, "Аналіз технічних характеристик і можливостей безпілотних авіаційних комплексів оперативного-тактичного та тактичного радіуса дії армій розвинених країн," *Військово-технічний збірник*, № 3, с. 70–74, 2010.
- [4.] Ю. М. Пашук та Ю. П. Сальник, "Тактичні безпілотні авіаційні комплекси: можливості та обмеження у застосуванні," *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 1(18), 2015.
- [5.] О. М. Жарик, "Досвід створення і застосування ударних БПЛА багаторазового використання: сучасний стан та перспективи подальшого розвитку, визначення потреби Повітряних Сил," *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 1(10), с. 30–38, 2013.
- [6.] О. Бурсала, Д. Горошко, П. Кульба та В. Чуприна, "Безпілотні літальні апарати повітряного бою," *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 1(1), с. 50–57, 2019. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/184>. [Дата звернення: 25 серп. 2025].
- [7.] E. L. Fleeman, *Missile Design Guide*. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2022.
- [8.] S. S. Chin, *Missile Configuration Design*. London, U.K.: McGraw-Hill, 1961.
- [9.] Р.К. Кадем, "Автоматизоване проектування безпілотних літальних апаратів," автореф. дис. канд. техн. наук, НАУ, Київ, Україна, 2011.
- [10.] R. Austin, *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*. Chichester, U.K.: John Wiley and Sons, Ltd, 2010.

<sup>1</sup>**Dmytro Brega** (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-5134-4351>

<sup>1</sup>**Vasyl Bakhin**

<https://orcid.org/0009-0002-6774-3266>

<sup>2</sup>**Pavlo Shabanov**

<https://orcid.org/0000-0003-4297-5534>

<sup>1</sup>**Andrii Humenyi** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-1020-6304>

<sup>1</sup>*National Aerospace University "KHAI", Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine*

## PRELIMINARY LAYOUTING OF A LIGHT SUBSONIC UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH A JET PROPULSION SYSTEM

*The article considers current trends in the development of unmanned aerial vehicles (UAVs), in particular aircraft-type ones with jet propulsion systems. It is shown that the experience of combat operations in Ukraine and the world confirms the key role of UAVs in the military and civilian spheres. An analysis of the advantages and limitations of the use of internal combustion engines, electric and jet engines is carried out, with the features of small turbojet engines for disposable strike drones being highlighted. A preliminary design of a jet UAV sample with specified tactical and technical characteristics was carried out, in particular, the mass parameters, wing and fuselage geometry, tail scheme were determined, and the aerodynamic characteristics were calculated using the Ansys Fluent software package. The results obtained made it possible to construct the polar of the aircraft and assess the aerodynamic efficiency in the subsonic speed range. The article substantiates the feasibility of using available small serially produced turbojet engines, in particular the Swiwin 300B, to create operational-tactical UAVs. The calculations presented confirm the possibility of achieving the required range, speed, and payload while maintaining the simplicity of the design and relatively low cost. The results obtained can be used in further improving the calculation methods and optimizing the design of unmanned aerial vehicles.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, jet propulsion system, aerodynamics, numerical modeling, turbojet engine.*

## References

- [1.] A. A. Khalatov, O. F. Nemchin, Ye. O. Shkvar, A. V. Kuzmin, and S. H. Kobzar, *Combat Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles with Jet Propulsion: Monograph*, A. A. Khalatov, Ed. Dnipro, Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [2.] O. E. Khruliev, "Analysis of the possibility of using commercial micro turbojet engines for high-speed small-sized UAVs of the operational-tactical level," *Aerospace Technic and Technology*, no. 4, spec. issue 2(190), pp. 5–18, 2023, <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4sup2.01>. (in Ukrainian)
- [3.] Yu. P. Salnyk and I. V. Matala, "Analysis of technical characteristics and capabilities of unmanned aerial systems of operational-tactical and tactical radius of action of the armies of developed countries," *Military-Technical Collection*, no. 3, pp. 70–74, 2010. (in Ukrainian)
- [4.] Yu. M. Pashchuk and Yu. P. Salnyk, "Tactical unmanned aerial systems: Capabilities and limitations in application," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, no. 1(18), 2015. (in Ukrainian)
- [5.] O. M. Zharyk, "Experience in creating and employing reusable strike UAVs: Current state and prospects for further development, determining the needs of the Air Force," *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, no. 1(10), pp. 30–38, 2013. (in Ukrainian)
- [6.] O. Bursala, D. Horoshko, P. Kulba, and V. Chupryna, "Unmanned aerial vehicles of air combat," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 1(1), pp. 50–57, 2019. [Online]. Available: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/184>. [Accessed: Aug. 25, 2025]. (in Ukrainian)
- [7.] E. L. Fleeman, *Missile Design Guide*. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2022.
- [8.] S. S. Chin, *Missile Configuration Design*. London, U.K.: McGraw-Hill, 1961.
- [9.] R. K. Kadem, "Automated design of unmanned aerial vehicles," Ph.D. dissertation abstract, *Nat. Aviation Univ.*, Kyiv, Ukraine, 2011. (in Ukrainian)
- [10.] R. Austin, *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*. Chichester, U.K.: John Wiley and Sons, Ltd, 2010.

# РОЗВИТОК ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОТОВАНОЇ ТА БЕЗПІЛотної АВІАЦІЇ

[DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-107-116](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2026-1-10-107-116)

[УДК 004.89:355.48:623.746.9](#)

<sup>1</sup>Шовкошитний Ігор Іванович (доктор технічних наук, старший дослідник)

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

<sup>2</sup>Василенко Ольга Анатоліївна (доктор філософії)

<https://orcid.org/0009-0002-6774-3266>

<sup>1</sup>Національний університет оборони України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 26.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 06.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

## КРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИБІР ЕВОЛЮЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ САМООРГАНІЗАЦІЇ ПРИРОДНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛотної ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ЗАДАЧАХ РОЗВІДКИ ТА УРАЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ПРОТИВНИКА

У статті здійснено критеріальний аналіз та обґрунтовано вибір еволюційних моделей самоорганізації природних систем, придатних для моделювання ройового застосування безпілотної літальних апаратів у задачах розвідки та ураження об'єктів противника. Проведено узагальнення математичних моделей ройової поведінки на основі біоінспірованих алгоритмів, зокрема моделей Вічека, Бойда, ройової оптимізації частинок, мурашиного та бджолиного алгоритмів, алгоритму сірих вовків, кажанів і методу штучних потенційних полів. Запропоновано систему критеріїв оцінювання математичних моделей, яка включає ступінь відповідності процесам ройового застосування безпілотної літальних апаратів, рівень математичної формалізації та обчислювальну складність. На основі проведеного аналізу визначено доцільність використання окремих моделей для опису різних етапів застосування рою безпілотної літальних апаратів, таких як узгоджений рух, уникнення перешкод, виявлення цілей, цілерозподіл та ураження об'єктів противника. Обґрунтовано перспективність застосування "гібридних моделей, що поєднують переваги різних підходів для забезпечення ефективного функціонування рою в умовах динамічної бойової обстановки. Результати дослідження можуть бути використані під час модернізації автономних бортових систем управління безпілотної літальних апаратів.

**Ключові слова:** самоорганізація, природні системи, кіберфізична система, безпілотної літальні апарати, ройове застосування, моделювання, математична модель, обчислювальна складність.

### Вступ

Аналіз досвіду сучасних воєнних конфліктів, особливо російсько-української війни з початку широкомасштабного вторгнення, а також стрімкого еволюційного розвитку технологій у військовій сфері свідчить про інтенсивне впровадження безпілотної систем, у тому числі ударних безпілотної літальних апаратів (БпЛА), які суттєво доповнюють традиційні види озброєння, а іноді стають ефективним інструментом асиметричної відповіді противнику. Розвиток безпілотної систем нині є актуальним і довгостроковим орієнтиром, що підтверджується чинними керівними документами [1], [2]. Разом із тим, розширення номенклатури БпЛА, змісту виконуваних ними завдань, а також постійно оновлюваний досвід їх бойового застосування спонукають протиборчі сторони до пошуку, апробації, впровадження та масштабування нових способів застосування

БпЛА, що є однією з важливих умов досягнення переваги над противником. Фактично протягом останнього десятиліття спостерігається еволюція способів застосування БпЛА з переходом від виконання поодиноких завдань (розвідки, логістики, ураження) окремими БпЛА до групового застосування БпЛА, яке (з урахуванням стрімкого розвитку у світі технологій штучного інтелекту) нині трансформується у новий перспективний спосіб застосування груп БпЛА на основі принципів самоорганізації та ройової взаємодії з фактичним виключенням оператора із контуру управління або суттєвим зменшенням його участі. Зазначене підтверджується зростанням кількості інноваційних проектних рішень з елементами штучного інтелекту та ройових технологій, які нині анонсуються розробниками як в Україні, так і в усьому світі. Висока активність розробок та тестувань технологій "роїв дронів" чітко

простежується на онлайн-платформі Bavel, що об'єднує військових та українських розробників для інтеграції інноваційних оборонних технологій [3].

У результаті аналізу ройових технологій, що з'являються на платформі Bavel, виявлено, що значну увагу військові фахівці та розробники приділяють питанням: упровадження елементів штучного інтелекту для забезпечення автономності роїв БпЛА і зменшення навантаження на оператора (або його виключення); самостійного обміну інформацією між БпЛА рою, автономного планування дій рою (маршрутів польоту) з урахуванням взаємної безпеки та огинання перешкод; керування великими групами БпЛА, що діють скоординовано; інтеграції в межах одного рою наземних і повітряних роботизованих платформ; автоматичного донаведення на цілі баражуючих боєприпасів або високоточних боєприпасів для БпЛА зі скидами; тестування, масштабування та оперативного впровадження ройових технологій з метою створення переваги на полі бою завдяки автоматизації та зниженню ризиків для операторів.

Кожна із задач є складною і потребує розроблення та впровадження відповідних математичних моделей та алгоритмів, які б найбільш повно відповідали суті типових швидкоплинних процесів, що відбуваються під час застосування роїв БпЛА, а також базувались на достатньо добре формалізованому математичному апараті.

Аналіз наукових публікацій [4]–[9] свідчить про значну увагу дослідників до проблем самоорганізації роїв БпЛА та моделювання їх застосування на окремих етапах. У [7] розглянуто моделі самоорганізації однорідних БпЛА під час вирішення слабоформалізованих завдань у бортовій системі за умови, що функції планування маршруту, розподілу ролей, визначення оптимальних дій, отримання та оброблення інформації можуть вирішуватися кожним БпЛА шляхом їх самоорганізації у групі. Авторами показано проблеми та узагальнено недоліки деяких методів самоорганізації, алгоритми самоорганізації, на підставі чого зроблено акцент на розробленні нових методів і моделей самоорганізації колективів однорідних БпЛА для підвищення ефективності виконання ними слабоформалізованих задач. У [5] запропоновано варіант формалізованої логіко-часової поетапної моделі застосування рою ударних БпЛА, а також зроблено припущення про можливість опису окремих процесів на етапах їх застосування за допомогою відомих алгоритмів самоорганізації (пташиної зграї, мурашиного, бджолиного, кажанів, косяка риб, генетичного алгоритму, рою частинок, світлячків, сірих вовків, стохастичного дифузійного пошуку, бактеріального пошуку, двійкового алгоритму бабки тощо). Водночас питання щодо адаптації цих ройових алгоритмів до конкретних задач, що виникатимуть на різних етапах застосування рою розвідувально-ударних

БпЛА, віднесені авторами до перспективних досліджень. Оскільки кожен з алгоритмів не є універсальним і має переваги та недоліки, логічно застосовувати так звані "гібридні" моделі, в яких для опису окремих процесів застосування роїв БпЛА передбачено застосування математичних постановок відомих оптимізаційних задач. Наприклад, у [6] показано, що поєднання оптимізаційних та нейромережових підходів дозволяє розв'язувати задачу цілерозподілу рою ударних БпЛА по різномірних об'єктах нестационарної групової цілі у реальному масштабі часу з урахуванням зміни складу групової цілі та рою. ударних безпілотних літальних апаратів. Проте така модель стосується лише процесу цілерозподілу БпЛА по об'єктах, але не описує процесів самоорганізації рою, як це робиться у природних біоінспірованих системах, у яких такий процес є аналогом вибору і атаки обраної ближчої або пріоритетної жертви. Отже, вибір математичної моделі для опису ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника є нетривіальним завданням, яке має вирішуватися з урахуванням конкретного завдання рою, процесів його внутрішньої самоорганізації, кінцевої мети, а також придатності наявних математичних моделей для опису типових процесів застосування рою БпЛА. Ступінь придатності математичних моделей (у тому числі тих, що описують поведінку природних систем) має визначатися на підставі низки критеріїв, а найбільш придатні моделі мають відбиратися на основі їх порівняльного аналізу. Обрані моделі або їх комбінації ("гібридні" моделі) мають описувати процеси самоорганізації рою БпЛА під час реалізації низки конкретних завдань, основними з яких слід вважати безпечний вихід рою в заданий район (з огинанням наявних природних перешкод і зон активної протидії противника), виявлення / розвідку цілей та їх узгоджене ураження.

Зазначене вище зумовлює актуальність обраної теми та дозволяє сформулювати мету статті, яка полягає у здійсненні критеріального аналізу відомих моделей самоорганізації природних систем, які доцільно використовувати для моделювання ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника.

### **Матеріали та методи**

Дослідження обраної у статті тематики базується на використанні окремих положень системного підходу, загальнонаукових методів аналізу і порівняння, методів багатокритеріального оцінювання складних процесів, елементів концептуального моделювання, теорії складності обчислень.

### **Результати**

Основна ідея статті базується на припущенні, що ройова взаємодія елементів (агентів) рою БпЛА більшою мірою притаманна живим (природним, біоінспірованим) системам, що зумовлено еволюційними чинниками формування їхньої ройової (колективної) поведінки, яка є важливою

умовою виживання будь-якої біологічної (природної) системи та виконання ними базових функцій. Це припущення дає можливість сформулювати гіпотезу про те, що математичні моделі, які описують ройову (колективну) поведінку біологічних систем (колоній), є більш прийнятними та раціональними порівняно з математичними моделями, постановки яких добре відомі у теорії дослідження операцій, але описують лише один конкретний процес, заданий цільовою функцією. Тобто приймається, що “природні моделі є більш раціональними”. З огляду на зазначене необхідно провести аналіз наявного науково-методичного апарату та обрати математичні моделі (з нині відомих), які найкраще описуватимуть групове (ройове) застосування БпЛА. Для опису процесів застосування груп (роїв) ударних БпЛА необхідно провести формалізований аналіз математичних моделей, серед яких будуть обиратись ті, що відповідають таким критеріям:

пристосованість до опису певних природних систем та процесів їхньої самоорганізації;

максимальна відповідність меті та завданням застосування рою БпЛА (серед яких основними є рух у заданий район, розвідка, наведення і ураження об'єктів групових цілей);

повнота формалізації (наявність чітких математичних постановок).

Застосування цих критеріїв дозволяє поєднати ідеї біоніки, яка передбачає застосування принципів дії живих систем і використання біологічних процесів для вирішення інженерних завдань [10], принципів кіберфізичних систем, компоненти яких взаємодіють на різних часових і просторових рівнях та можуть мати різні моделі поведінки й адаптивно взаємодіяти між собою [11], з жорсткими вимогами до математичної формалізації суто військової задачі (застосування рою БпЛА для пошуку та ураження об'єктів групових цілей) із адаптацією опису процесів у біологічних системах до алгоритмічного керування просторово розподіленими об'єктами, об'єднаними єдиною метою.

З точки зору моделювання ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника, окрім традиційних математичних постановок, відомих з теорії дослідження операцій, значний інтерес становлять моделі самоорганізації складних систем, що підкріплені формалізованими математичними та алгоритмічними описами процесів, у яких складна структура або порядок виникають у системі без

прямого зовнішнього впливу, лише завдяки внутрішній взаємодії її елементів [12].

Подібні моделі описують процеси, які відбуваються в біологічних / природних системах, утворених унаслідок тривалого еволюційного розвитку. При цьому вони можуть описуватись як складні структури, що виникають із локальних взаємодій простіших елементів системи, які в теоретичних роботах часто іменуються авторами як агенти, юніти, боїди тощо.

На підставі аналізу джерел [4; 9; 13–16] у табл. 1. наведено коротку характеристику деяких математичних моделей, які за двома критеріями (математична формалізація і обчислювальна складність) умовно можуть бути придатними для опису біологічних / природних систем і які слід розглядати як можливі прототипи для опису “ройової поведінки” або “ройового застосування” БпЛА під час пошуку та ураження ними об'єктів противника в автономному режимі або за мінімальної участі оператора.

З метою можливості порівняння математичних моделей, викладених у табл. 1, введено такі критерії: ступені відповідності математичних моделей змісту процесів та меті застосування рою БпЛА, а також ступені формалізації математичних моделей – високий, середній, низький; типові процеси застосування роїв БпЛА – узгоджений рух, огинання завад (небезпечних зон, зокрема ППО, РЕБ), виявлення цілей, цілерозподіл (ЦР), ураження.

Зважаючи на доволі значну кількість подібних моделей і різний ступінь їхньої придатності для опису властивостей складної автономної кіберфізичної системи, якою можна представити рої БпЛА, основну увагу під час аналізу було зосереджено на тих математичних моделях і алгоритмах, які мають:

найкращу математичну формалізацію (що вказує на можливість їх застосування для опису процесів застосування роїв БпЛА без необхідності їх суттєвої адаптації до змісту типових задач розвідки, цілерозподілу, наведення тощо);

припустиму обчислювальну складність (ОС) і детермінованість (табл. 2), які вказуватимуть на можливість їх використання у задачах реального часу та здатність алгоритмів гарантовано завершити роботу (завдання) у заданий час (що у швидкоплинних умовах бойової обстановки є критичним для рою БпЛА).

Таблиця 1

**Характеристика математичних моделей, що використовуються для опису природних / біологічних систем, процесів їх самоорганізації і групової поведінки (прототипів, придатних для опису “ройової поведінки” БпЛА)**

Природна / біологічна система, математична модель, що їх описує	Ступінь відповідності змісту процесів та меті застосування рою БпЛА, можливість опису типових процесів застосування роїв БпЛА	Ступінь формалізації математичних постановок	Придатність до застосування в задачах реального часу (з точки зору ОС)
Зграї птахів / косяки риб,	<i>Середній</i> . Підходить для опису спільного польоту групи БпЛА без зіткнень під час прихованого виходу до району розвідки та	<i>Високий</i>	<i>Низька</i> . ОС базової моделі висока ( $O(n^2)$ – квадратична)

Природна / біологічна система, математична модель, що їх описує	Ступінь відповідності змісту процесів та меті застосування рою БПЛА, можливість опису типових процесів застосування роїв БПЛА	Ступінь формалізації математичних постановок	Придатність до застосування в задачах реального часу (з точки зору ОС)
модель Вічека ( <i>Vicsek model</i> )	спільного патрулювання. Це класична модель самоорганізації, де кожен агент вирівнює свій вектор швидкості з векторами сусідів. Опис процесу розвідки, цілерозподілу, наведення на ціль не забезпечується.		через необхідність перевірки відстані між усіма парами агентів. <b>Середня</b> – у разі просторового розбиття для скорочення пошуку сусідів. При цьому ОС зменшується до логарифмічної $O(n \log n)$ або лінійної $O(n)$ .
Зграї птахів, модель Крейга Рейнольдса ( <i>Boids</i> )	<b>Середній</b> . Як і попередня модель, описує спільний політ БПЛА без зіткнень, придатний для опису спільного патрулювання.	<b>Високий</b>	
Фізика частинок / потенційні поля, метод штучних потенційних полів ( <i>Artificial Potential Fields, APF</i> )	<b>Середній</b> . Може бути застосовано для опису узгодженого руху групи (рою) БПЛА, огинання перешкод (ШПО, РЕБ) та кінцевого етапу атаки об'єктів. Метод забезпечує високу точність наведення БПЛА та гарантовану відсутність зіткнень. <b>Виявлення цілей не описується</b> , а ЦР здійснюється ситуативно.	<b>Високий</b>	<b>Висока</b> . ОС є близькою до лінійної $O(m \times n)$ . Для стійкої роботи алгоритму потрібно вирішити проблему виходу з локальних мінімумів та нестабільності руху.
Вовча зграя, модель оптимізації <i>Grey Wolf Optimizer, GWO</i>	<b>Середній</b> . Може бути застосовано для опису дій рою різнотипних БПЛА, з розподілом функцій пошуку (виявлення) та (ураження) цілей БПЛА. Одночасне виявлення та ураження декількох цілей не забезпечується.	<b>Високий</b>	<b>Середня</b> . ОС є близькою до лінійної $O(n)$ (залежить від кількості ітерацій)
Зграї птахів / косяків риб, алгоритм ройової оптимізації частинок ( <i>Particle Swarm Optimization, PSO</i> )	<b>Середній</b> . Може бути використано в задачах оптимізації, зокрема для планування маршрутів роїв БПЛА, координації руху та пошуку цілей. Алгоритм PSO завдяки інерційній складовій є ефективним під час динамічного пошуку цілей. Водночас модель не враховує фізичні обмеження руху агентів і може збігатися ("застрягати" в локальних мінімумах, що знижує її адекватність).	<b>Високий</b>	<b>Висока</b> . ОС лінійна $O(n)$ і залежить від кількості БПЛА у рої та розмірності простору пошуку. Тому PSO є одним із найбільш ефективних алгоритмів для задач у реальному часі.
Колонії мурах, мурашиний алгоритм оптимізації ( <i>Ant colony optimization, ACO</i> )	<b>Низький</b> . Оптимізація маршрутів БПЛА розвідки, логістика. Дозволяє організувати маршрутизацію БПЛА з певними ресурсами або устаткуванням по вузлах (точках маршруту). Алгоритм збільшує централізацію управління і важко адаптується до задач реального часу.	<b>Середня</b>	<b>Низька</b> . ОС моделі висока ( $O(n^2)$ – квадратична), адже необхідно враховувати значну кількість вузлів (цілей, точок маршруту), кількість БПЛА у рої та значну кількість ітерацій.
Бджолиний рій, алгоритм штучної бджолиної колонії ( <i>Artificial Bee Colony Algorithm, ABC</i> )	<b>Високий</b> . Пошук цілей (джерел ресурсу), оцінка пріоритетів, розподіл ролей (розвідка, спостереження, ураження, логістика). Доцільне використання під час розподілу виявлених цілей для їх подальшого ураження.	<b>Високий</b>	<b>Середня</b> . ОС є лінійною. Легко адаптується до зміни кількості цілей, що робить її придатною для систем реального часу та для використання у бортових обчислювачах. Проте алгоритм потребує більше ітерацій для точного наведення БПЛА.
Зграя кажанів, алгоритм кажанів ( <i>Bat Algorithm</i> )	<b>Середній</b> . Алгоритм ідеально підходить для кінцевого етапу наведення БПЛА на ціль з використанням бортових активних засобів розвідки. Ехолокаційна природа алгоритму дозволяє описувати тривимірне маневрування БПЛА.	<b>Високий</b>	<b>Висока</b> . ОС є лінійною $O(n)$ . Алгоритм гнучкий та простий у реалізації, використовує контроль параметрів, який може змінювати значення параметрів у процесі ітерацій.

Таблиця 2

## Порівняльна таблиця придатності математичних моделей (алгоритмів) для задач реального часу

Клас складності	Придатність	Прогнозованість	Ризики
$O(1)$ Константна	Найвища	Абсолютна	Відсутні
$O(\log n)$ Логарифмічна	Висока	Дуже висока	Мінімальні
$O(n)$ Лінійна	Висока	Висока (якщо $n_{max}$ відоме)	Перевищення $n_{max}$
$O(n \log n)$ Лінійно-логарифмічна	Середня	Добра	Сплески навантаження
$O(n^k)$ Квадратична	Низька	Низька	Швидка деградація системи
$O(2^n)/O(n!)$ Експоненціальна	Відсутня	Відсутня	Повне зупинення системи

Для пояснення моделей, згаданих у табл. 1, та більш повного розуміння можливості їх застосування для опису “ройової поведінки” БПЛА наведемо їхній узагальнений опис, основні математичні вирази, якими вони задаються, а також оцінювальну характеристику їхньої обчислювальної складності.

*Модель Вічека (Vicsek model)* [13] – класична модель самоорганізації, що описує рух зграї птахів, у якій кожен агент вирівнює свій вектор швидкості з векторами сусідів. Два птахи опиняються поруч, синхронізують швидкості, щоб летіти в одному напрямку. Рух зграї стає більш керованим зі збільшенням щільності птахів у повітрі, оскільки кожен птах збільшує кількість сусідів, з якими координує свій рух. Модель має найвищий ступінь формалізації, дозволяє аналітично розрахувати фазовий перехід від хаотичного положення агентів до їх шикуння у “строю”:  $\Theta_i(t + \Delta t) = \langle \Theta_j(t) \rangle_r + \eta_i(t)$ , де  $\Theta_i(t)$  – вектор швидкості  $i$ -го агента,  $\langle \Theta_j(t) \rangle_r$  – середній напрямок швидкостей агентів,  $\eta_i(t)$  – шумова невизначеність.

Така модель підходить для опису узгодженого руху БПЛА під час польоту до цілі та ведення розвідки. Складність базової моделі квадратична  $O(n^2)$  на один часовий крок через необхідність перевірки відстані між усіма парами агентів для визначення сусідів. Час зростає пропорційно квадрату даних. Тобто якщо кількість БПЛА рою зростатиме вдвічі, час оброблення зростатиме вчетверо, що може призвести до збоїв алгоритму. Отже, модель Вічека може бути застосована для задач невеликої розмірності (малих роїв БПЛА) і лише для опису узгодженого руху під час спільного виявлення об'єктів противника.

*Модель Voids* [14] являє собою модель симуляції колективної поведінки, яка імітує рух птахів (“агентів” – боїдів / Voids) і базується на простих локальних правилах – розділення (утримання безпечної відстані для уникання зіткнень), вирівнювання (створює однорідність і дозволяє зграї летіти з однією швидкістю в одному усередненому напрямку), згуртування (рух до центру – кожен агент намагається триматись ближче до загального “центру мас” зграї). Агенти орієнтуються лише на сусідів, а не на всю зграю або на лідера. Математично модель описує рух окремого агента (боїда) через зміну його вектора швидкості під дією трьох основних сил (правил): розділення (р), вирівнювання (в) та згуртування (з):  $\vec{v}_i(t + \Delta t) = \vec{v}_i(t) + \vec{a}_i(t)\Delta t$ ,  $\vec{a}_i = w_p \vec{F}_p + w_v \vec{F}_v + w_z \vec{F}_z$ , де  $\vec{a}_i$  – прискорення,  $w^*$  – вагові коефіцієнти.

Спрощена алгоритмічна модель руху зграї враховує: обмеження області видимості; відстань сприйняття сусідів (характеризує чутливість моделі); притягання і відштовхування:  $f_{пв} = 1/d^2$ .

Модель є максимально природною та реалістичною, орієнтована на траєкторну динаміку, гнучко адаптується до змін середовища, а тому

добре підходить для опису групової та ройової поведінки БПЛА (планування руху роїв) з уникненням взаємних зіткнень, узгодженим рухом і збереженням бойового порядку на маршруті польоту рою. При цьому централізований контроль рою відсутній (БПЛА рою локально взаємодіють з ближчими сусідніми БПЛА), а його поведінка є результатом самоорганізації.

Водночас зазначена модель у строгому математичному сенсі не забезпечує глобальної оптимізації, а за певних умов може призводити до хаотичних траєкторій агентів (БПЛА), що потребує введення додаткових правил.

Складність базової моделі квадратична  $O(n^2)$ , що може бути критичним для реального часу. Перелік правил може бути доповнений введенням додаткових факторів, таких як “пошук їжі” (виявлення цілей), обхід перешкод, “уникнення хижаків” (оминання небезпечних зон), що додатково збільшуватиме ОС моделі. Зазначене вказує на низьку придатність для опису процесів польоту великих роїв БПЛА та додаткових функцій (окрім злагодженого польоту). Але складність може бути зменшена у разі застосування евристичних алгоритмів просторового розбиття (наприклад,  $k$ -мірного дерева пошуку для упорядкування точок у просторі). Це дозволяє скоротити пошук сусідніх агентів дерева або хешування сітки / Grid hashing та зменшує ОС завдяки скороченню часу пошуку сусідів до рівня  $O(n \log n)$  або до  $O(n)$ .

*Модель ройової оптимізації частинок (Particle Swarm Optimization, PSO)* базується на спостереженнях за поведінкою зграї птахів і косяків риб (запропоновано Кеннеді і Еберхартом у 1995 р.) [9]. Передбачається, що кожен агент (у нашому випадку БПЛА) рухається в багатовимірному просторі завдань, оновлюючи свою швидкість і позицію, керуючись власним досвідом і досвідом інших агентів рою.

Перевагами моделі є простота реалізації, мала кількість параметрів і здатність ефективно знаходити глобальні екстремуми у багатовимірному просторі. Рух кожної частинки визначається трьома складовими: інерційною (поточний напрямок руху), когнітивною (тяжіння до власного найкращого досвіду) та соціальною (тяжіння до найкращого рішення зграї птахів, що забезпечує збалансоване поєднання глобального пошуку рішення у всьому рої та власних (локальних) найкращих рішень кожної частинки).

Модель PSO є метаевристичним алгоритмом оптимізації і в математичній постановці відображає рівняння оновлення швидкості частинки (агента) як поєднання трьох впливів – інерції, власного та колективного досвіду та описується рівнянням:  $\vec{V}_i = \omega \vec{V}_i + c_1 r_1 (p_i - x_i) + c_2 r_2 (g - x_i)$ , де  $\omega$  – коефіцієнт інерції;  $r_1, r_2$  – випадкові величини, що забезпечують стохастичність пошуку;  $\omega = \arg \min_{p_i} f(p_i)$  – глобальний мінімум (оптимальне значення цільової функції).

У контексті використання моделі для опису

застосування роїв БПЛА це рівняння відображає ключову ідею алгоритму: рух БПЛА описується рівняннями їхньої швидкості та положення, кожний БПЛА рухається, враховуючи власну траєкторію, а найкраще знайдене для нього рішення та найкраще рішення всього рою забезпечує колективний пошук оптимуму. При цьому самоорганізація рою забезпечується завдяки інформаційній взаємодії між БПЛА (не напряму, а через глобальні або локальні найкращі значення), пошуковий простір є абстрактним багатовимірним простором параметрів, а динаміка рою визначається математичними формулами оптимізації.

Модель PSO є простою в реалізації, має високу швидкість збіжності й може бути використана в задачах оптимізації, зокрема для планування маршрутів роїв БПЛА. Проте ця модель не враховує фізичні обмеження руху агентів і може “застрягати” в локальних мінімумах. Це може бути компенсовано завдяки застосуванню модифікацій алгоритму з адаптивною інерцією, що дозволяє рою бути швидким на етапі пошуку і точним на етапі наведення.

За критерієм ОС алгоритм PSO вважається одним із найбільш ефективних для реального часу завдяки своїй лінійності. У класичному алгоритмі кожному БПЛА потрібно враховувати лише один вектор (найкращу позицію рою). Це мінімізує навантаження на канали зв'язку, а кожен БПЛА може обчислювати свій вектор незалежно. Отже, алгоритм PSO є інструментом пошуку оптимального рішення, на відміну від моделі Voids, яка забезпечує моделювання автономних децентралізованих систем та колективного руху агентів.

*Метод штучних потенційних полів (Artificial Potential Fields, APF)* базується на математичному апараті класичної фізики (фізики частинок, електростатики та гравітації) і є популярними у галузі робототехніки, особливо для планування шляху агентів у реальному часі та уникнення перешкод [15]. Стосовно роювої взаємодії кожен БПЛА має розглядатись як заряджена частка, яка рухається у силовому полі, “відштовхується” від перешкод та інших БПЛА рою (точок з високим потенціалом), але “притягується” до цілей (точок з мінімальним потенціалом).

Математично модель описує вектор сили, що діє на БПЛА-агента у такому вигляді:  $\vec{F}(q) = -\nabla U(q) = -\nabla U_b(q) - \nabla U_n(q)$ , де  $U_b(q)$  – сумарний потенціал у точці  $q = (\partial U / \partial x; \partial U / \partial y)$  (вектор координат агента), що складається з компонентів відштовхування від перешкоди та притягання до цілі  $U_b(q)$ ,  $U_n(q)$ . Модель вважається ідеальною для задач реального часу, оскільки її ОС є близькою до лінійної  $O(m \times n)$ , де  $m$  і  $n$  – відповідно кількість агентів рою та кількість перешкод, а обчислення є локальними, адже агенту достатньо даних від бортових сенсорів у заданому радіусі. Отже, така модель є ідеальною для бортових обчислювачів (контролерів), встановлених на БПЛА, за відсутності жорстких

вимог до їхньої швидкодії. Обмеження застосування моделі з математичної точки зору пов'язані із її “зависаннями” у певних варіантах взаємного розміщення завад і цілей (за умови  $U_b(q) + U_n(q) = 0$ ) або нестабільного руху агентів під час їх проходження між декількома завадами. Подолання обмежень можливе завдяки застосуванню “гібридних” варіантів моделей, наприклад, шляхом комбінування алгоритмів APF і Voids: перший забезпечуватиме огинання завад та рух до цілі, другий підтримуватиме внутрішню структуру рою.

*Модель (алгоритм) оптимізації сірих вовків (Grey Wolf Optimizer, GWO)*, запропонована Сейедалі Мірджалілі у 2014 році, імітує ієрархію та механізм полювання зграї сірих вовків. Алгоритм базується на суворій соціальній ієрархії популяції (зграї) вовків, які поділяються на 4 домінуючі групи:  $\alpha$  – лідер зграї,  $\beta$  – помічник лідера,  $\delta$  – досвідчені мисливці (вартові, розвідники),  $\omega$  – решта членів зграї.  $\beta$  і  $\delta$  підтримують  $\alpha$  і можуть його замінити у разі потреби. Полювання зграї поділяється на три етапи: пошук жертви, оточення та напад. Математично модель полювання вовчої зграї передбачає ітераційне оновлення координат агентів (вовків) відносно трьох лідерів ( $\alpha$ ,  $\beta$  і певною мірою  $\delta$ ), які є більш досвідченими та більш повно обізнані в обстановці.  $X_i(t+1) = (X_\alpha + X_\beta + X_\delta) / 3$ , де  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ ,  $X_\delta$  – позиції вовків-лідерів.

З точки зору проблеми застосування роїв БПЛА можна припустити, що  $\alpha$  – це БПЛА (або група), який має найстійкіший візуальний (або радіоелектронний) контакт із ціллю та визначає напрямок для атаки,  $\beta$  і  $\delta$  – допоміжні БПЛА, які контролюють ціль з інших боків та підстраховують  $\alpha$  у разі його можливої втрати.  $\omega$  – ударні БПЛА (баражуючі боєприпаси або БПЛА зі скидами), які здійснюють маневр у районі цілі, орієнтуючись на координати, передані від  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\delta$ . Позиції БПЛА лідерів  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ ,  $X_\delta$  визначаються з урахуванням необхідної дистанції підризу або пуску боєприпасу. Після виявлення цілі ударні БПЛА  $\omega$  починають стягуватися до простору між БПЛА-лідерами, що для рою можна вважати переходом до атаки. Кожен БПЛА обчислює свій вектор руху таким чином, щоб опинитися в зоні цілі.

Зазначена модель є важливою, оскільки, на відміну від моделі Voids, вона не лише описує рух агентів, а й реалізує алгоритм колективного пошуку та оточення цілі з дотриманням властивості ієрархічності агентів. Зазначене свідчить про можливість використання моделі GWO, яка відповідає логіці процесів “розвідка” та “ураження”, для опису застосування рою різнотипних БПЛА з розподілом серед них типових функцій. Також модель може бути доцільною для варіанта розподіленого ураження об'єктів групової цілі під час дії БПЛА рою з різних напрямків. Крім того, модель GWO, порівняно з моделлю Voids для задач ураження, має низку таких переваг: стійкість до втрат, мінімізація обміну даними між агентами рою, оптимальність траєкторії агентів на шляху до цілі, що зменшує час перебування БПЛА в зоні

можливої протидії противника.

Обчислювальна складність моделі є близькою до лінійної і залежить від кількості агентів, які орієнтуються не на всіх сусідів, а лише на лідерів ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Це підвищує оперативність розрахунків і збіжність їхніх результатів, що є критичним для задач реального часу, особливо якщо ціль постійно маневруватиме. Проте теоретично існує ризик передчасної збіжності моделі, що може призвести до неоптимального використання потенціалу рою, коли всі ударні БпЛА  $\omega$  зосереджуватимуться на доступній, видимій для лідерів  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\delta$ , а не на пріоритетній цілі (всі БпЛА злетяться в одну точку, яка не є ідеальною ціллю).

*Модель мурашиної колонії (Ant colony optimization, ACO).* Ідея моделі базується на тому, що мурахи здійснюють початковий пошук їжі у випадковому порядку, після знаходження повертаються в мурашник, залишаючи феромоновий слід, за яким будуть рухатись інші мурахи до джерела їжі, додатково зміцнюючи шлях феромонами. Чим сильніший феромоновий слід, залишений на шляху, тим більша кількість мурах обиратиме його для себе.

Для опису поведінки рою БпЛА цю модель можна використати обмежено, наприклад, для вибору оптимального виконавця часткової задачі – планування оптимального маршруту БпЛА рою (мурах) з необхідним устаткуванням (ресурсами), які рухаються один за одним через ключові точки або мережеві вузли. Феромони на шляху в мурашиній системі можуть бути представлені як пріоритети підзадач рою. Феромон-пріоритетність використовується як параметр, на підставі якого алгоритм обиратиме підзадачу рою, маршрут і призначатиме БпЛА-виконавців. Коли підзадача призначена виконавцю, розглядається стан її виконання, розміри робіт, а також час виконання для того, щоб вибрати необхідні БпЛА (з необхідним ресурсом), і оцінюється їхня ефективність.

Математично модель описує ймовірність того, що “мураха” (БпЛА) буде рухатись  $i$ -м шляхом  $P_i = (\tau_i)^\alpha (\eta_i)^\beta / \sum ((\tau_{ik})^\alpha (\eta_{ik})^\beta)$ , де  $\tau_i$  – феромон (історія успіху інших БпЛА на цьому шляху),  $\eta_i$  – евристика, що визначає локальну привабливість шляху,  $\alpha$  і  $\beta$  – відповідно величини, що визначають жадібність (успішність) та стадність (привабливість) алгоритму.

Цей алгоритм є найскладнішим з усіх розглянутих (Voids, PSO, GWO тощо) з точки зору реального часу, адже має квадратичну складність  $O(n^k)$ , потребує врахування значної кількості вузлів (цілей, точок маршруту), кількості БпЛА у рої та значної кількості ітерацій.

*Алгоритм штучної бджолоїної колонії (Artificial bee colony algorithm, ABC)* описує поведінку бджіл під час пошуку нектару: існує деяке джерело нектару, яке характеризується певною корисністю (віддаленість від вулика, концентрація, зручність видобутку). Бджоли-розвідники здійснюють обліт території і пошук джерел нектару для його збирання. Після повернення у вулик бджоли-

розвідники “вербують” вільних бджіл на виявлені джерела нектару. Механізми прийняття рішень стосовно вибору джерел досліджені недостатньо. Імовірність вербування визначається корисністю відповідного джерела нектару. Завербована бджола йде за обраною бджолою-розвідником до області з нектаром і стає, таким чином, зайнятим носієм, який після збирання нектару повертається у вулик і залишає його там. Після цього носій може: залишити “своє” джерело нектару і стати незайнятим; продовжити заготовівлю нектару, не вербуючи інших бджіл; виконати вербування. Бджола обирає одну зі вказаних дій певним імовірнісним законом. Модель заснована на жорсткій ієрархії з розподілом популяції на три групи – бджоли-розвідники, робочі бджоли та бджоли-спостерігачі.

Цю модель доцільно використовувати під час розподілу виявлених цілей для подальшого ураження. У задачах, пов’язаних із роями, у яких є різні типи БпЛА або БпЛА з різними функціями, ця модель може бути корисною для розподілу ресурсів та цілевказання в умовах невизначеності. Також вона може бути використана для одночасного пошуку багатьох цілей на великій території із розподілом БпЛА-розвідників пропорційно важливості виявлених цілей, а також під час розподілу виявлених цілей для подальшого їх ураження. При цьому алгоритм забезпечує гнучкий розподіл ресурсу рою та припинення атак на ціль, що вже знищена. Недоліками алгоритму можна вважати повільну збіжність та складність урахування логіки вибору станів вільних БпЛА, що математично чітко не описується.

З точки зору обчислювальної складності модель бджолоїного рою вважається досить легкою для обчислень, що робить її придатною для систем реального часу. Час обчислень зростає пропорційно кількості БпЛА у рої, що є оптимальним для бортових обчислювачів.

*Алгоритм, інспірований кажанами (Bat-Inspired, BI)* [16], запропонований Янгом у 2010 році, моделює поведінку кажанів. Алгоритм поєднує в собі елементи PSO (з його властивістю інерційності) та локального пошуку здобичі з використанням фізичної моделі ультразвукової ехолокації за допомогою ефекта Доплера.

Для опису поведінки рою БпЛА застосування алгоритму є виправданим, оскільки він імітує активне зондування простору за допомогою бортової радіолокаційної станції або лазерного далекоміра, встановлених на БпЛА. Для вимірювання відстані до здобичі й перешкод, їх розрізнення кажани (БпЛА) здійснюють пошук, змінюючи потужність, частоту сигналів  $[\omega^{min}, \omega^{max}]$ ,  $\omega^{max} > \omega^{min} \geq 0$  і частоту повторення випромінюваних імпульсів. Потужність сигналу зменшується, а частота повторення імпульсів зростає з наближенням БпЛА до цілі (що може інтерпретуватись як перехід у режим точного прицілювання з більш частим оновленням даних).

У короткій математичній інтерпретації алгоритм кажанів передбачає оновлення частоти  $\omega_i = \omega^{min} + (\omega^{max} - \omega^{min})\beta$ ,  $\beta \in [0; 1]$  (кажан випадково вибирає частоту, яка визначає, наскільки сильно він має змінити напрямки та швидкість пошуку), швидкості  $V_i' = V_i + \overline{\omega}(X_i - X^{**})$  (кажан змінює швидкість так, щоб рухатися в напрямку найкращого знайденого рішення  $X^{**}$  з урахуванням різної частоти) і положення  $X_i' = X_i + V_i'$  так, щоб поступово наближатися до найкращого рішення  $X_i'$ .

Обчислювальна складність алгоритму є лінійною (як у GWO та PSO). Крім того, завдяки адаптивній зміні параметрів гучності та частоти алгоритм автоматично переходить від глобального пошуку до локального визначення цілі, що зменшує обчислювальні витрати на етапі фінального наведення. Зазначене свідчить про можливість використання алгоритму для опису застосування рою БпЛА у реальному часі (на етапах пошуку цілі і наведення на ціль з використанням активних бортових засобів розвідки). Водночас, алгоритм є занадто чутливим до початкових параметрів і потребує ретельного їх налаштування під динаміку польоту рою БпЛА з метою уникнення спрямування БпЛА на хибні або вже атаковані цілі (проблема застрягання у локальних мінімумах).

### Обговорення

Отримані результати порівняння низки відомих математичних моделей самоорганізації природних систем підтверджують актуальність проблеми математичного опису найбільш суттєвих процесів, які характеризують застосування роїв БпЛА в умовах швидкоплинної бойової обстановки.

Кожна з моделей має свої особливості й може бути використана для опису одного або декількох процесів, які виникають на різних етапах застосування роїв БпЛА (зокрема, узгоджений рух, огинання завдань (небезпечних зон, наприклад, ППО, РЕБ), виявлення цілей, цілерозподіл, ураження), з урахуванням специфічних механізмів самоорганізації (ройової взаємодії), характерних для природних біоінспірованих систем. Зазначені моделі, у разі адаптування до завдань застосування роїв БпЛА, доцільно впроваджувати на програмному рівні в автономних системах управління роями БпЛА або використовувати їх для отримання навчальних даних для нейромережових моделей, які будуть покладені в основу інтелектуальних систем прийняття рішень на різних етапах застосування БпЛА з урахуванням поточної обстановки.

Наведений у статті перелік моделей не є вичерпним. Тому надалі потрібно приділити увагу й іншим еволюційним методам і моделям, які передбачають розвиток популяції і селекцію властивостей, необхідних для її виживання та ефективного виконання базових функцій, близьких за змістом до функцій, виконуваних роями БпЛА.

### Висновки

Отже, у статті проведено критеріальний аналіз низки відомих моделей самоорганізації природних систем, які можуть бути розглянуті як прототипи

для моделювання ройового застосування БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника. Під час аналізу перевага надавалась моделям і алгоритмам, які мають: найкращу математичну формалізацію (що вказує на можливість їх застосування для опису процесів застосування роїв БпЛА без необхідності їх суттєвої адаптації до змісту типових задач розвідки, цілерозподілу, наведення тощо) та припустиму обчислювальну складність, що свідчить про можливість їх використання у задачах реального часу, що є критичним для роїв БпЛА.

Показано, що кожна із представлених еволюційних моделей самоорганізації природних систем має свої особливості й може бути застосована для опису певних етапів застосування роїв БпЛА, а вибір конкретної моделі або групи моделей залежить від потенційного складу, завдань та кінцевої мети застосування рою БпЛА. Визначено, що для максимального врахування всіх можливих аспектів самоорганізації природних систем під час опису ройової поведінки БпЛА в задачах розвідки та ураження об'єктів противника більш доцільно перейти до "гібридних" моделей, що є предметом окремих досліджень. Зокрема, для опису процесів застосування рою різнофункціональних БпЛА для виявлення та ураження динамічних об'єктів може бути розглянуто "гібридну" модель, яка поєднуватиме модель GWO на етапі пошуку цілей, модель Voids для опису узгодженого безпечного польоту та маневрування рою на маршруті до району виконання завдань, модель APF для огинання перешкод (небезпечних зон) без зіткнень і наведення на ціль. Якщо ціль є груповою та має об'єкти різних пріоритетів, "гібридна" модель може доповнюватись типовими оптимізаційними моделями цілерозподілу потенціалу рою БпЛА з пріоритетами [6].

Матеріали, представлені у статті, можуть бути корисними для науковців, які досліджують проблеми автономного управління роботизованими системами, розробників бортових систем, у яких передбачатиметься автономне управління застосуванням однорідних або різнорідних роїв розвідувально-удвних БпЛА під час виконання ними типових бойових завдань.

### Список використаних джерел

- [1.] Командування ПС ЗСУ, Візія Повітряних Сил 2035. Київ, Україна: Міністерство оборони України, 2020.
- [2.] Головнокомандувач Збройних Сил України, Стратегія розвитку Повітряних Сил на період до 2035 року, наказ. Київ, Україна: МОУ, КПС ЗСУ, 2020.
- [3.] "Кластер підтримки Defense Tech розробок в Україні," Brave1. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://brave1.gov.ua/>
- [4.] А. В. Тристан та Д. І. Жуков, "Моделі самоорганізації колективу однорідних безпілотних літальних апаратів при рішенні слабоформалізованих завдань," Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, № 2(55), с.

- 32–39, 2024, <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.04>.
- [5.] I. I. Шовкошитний та О. А. Василенко, "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 НУОУ, № 3(83), с. 108–116, 2024, <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116>.
- [6.] I. I. Шовкошитний та О. А. Василенко, "Математична модель застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей із використанням елементів штучного інтелекту," Повітряна міць України, № 2(9), с. 48–56, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-48-56>.
- [7.] C. Gershenson, "Self-organizing systems: What, how, and why?," *nj Complexity*, no. 10, pp. 1–8, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s44260-025-00031-5>.
- [8.] F. Heylighen, "The science of self-organization and adaptivity," in *The Encyclopedia of Life Support Systems*, L. D. Kiel, Ed. Oxford, U.K.: EOLSS Publishers, 2003.
- [9.] О. А. Василенко, "Методи математичного моделювання застосування рою ударних безпілотної літальних апаратів," Повітряна міць України, № 1(8), с. 54–70, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70>.
- [10.] "Біоніка," *Енциклопедія сучасної України*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://esu.com.ua/article-35330>
- [11.] *Transactions on Cyber-Physical Systems*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://surl.li/grcywu>
- [12.] Н. М. Бережна та В. С. Білокопитова, "Самоорганізація складних систем," у *Матеріали заоч. наук.-практ. інтернет-конф. Вітчизняна географічна наука: теорія і практика*, Харків, Україна, 12 листоп. 2016, с. 34–46.
- [13.] "Люди, як рідина: Що таке активна матерія та як вона пояснює фізику життя?," *Nauka.ua*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://nauka.ua/article/aktivna-materiya>
- [14.] "Swarm algorithms." [Електронний ресурс]. Доступно: <https://surl.li/hluxsa>
- [15.] І. Берізка та І. Карбовник, "Математична модель модифікованого методу штучних потенціальних полів з використанням функції Лапласа для уникнення перешкод в режимі реального часу," *Науковий журнал «Прикладні проблеми комп'ютерних наук, безпеки та математики»*, № 3, с. 12–22, 2024.
- [16.] E. V. Kuliev, A. A. Lezhebokov, and Y. A. Kravchenko, "A swarm algorithm for search engine optimization based on bat behavior modeling." [Електронний ресурс]. Доступно: <https://surl.li/xiiyvj>

<sup>1</sup>Ihor Shovkoshtnyi (Doctor of Technical Science, Senior Research Fellow)

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

<sup>2</sup>Olha Vasylenko (PhD)

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

<sup>1</sup>National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## CRITERIA-BASED ANALYSIS AND SELECTION OF EVOLUTIONARY MODELS OF SELF-ORGANIZATION IN NATURAL SYSTEMS FOR MODELING THE SWARM APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE TASKS OF INTELLIGENCE AND ATTACKING ENEMY OBJECTS

*The article presents a criterion-based analysis and justifies the choice of evolutionary models of self-organization of natural systems suitable for modeling the swarm application of unmanned aerial vehicles in reconnaissance and destruction of enemy objects. The generalization of mathematical models of swarm behavior based on bioinspired algorithms is carried out, in particular, the Wichek and Boyd models, particle swarm optimization, ant and bee algorithms, gray wolf and bat algorithms, and the method of artificial potential fields.*

*The system of criteria for evaluating mathematical models is proposed, which includes the degree of compliance with the processes of swarm application of unmanned aerial vehicles, the level of mathematical formalization, and computational complexity. Based on the analysis, the feasibility of using individual models to describe different stages of the use of a swarm of unmanned aerial vehicles, such as coordinated movement, obstacle avoidance, target detection, target assignment, and destruction of enemy objects, is determined. The prospects of using "hybrid models" that combine the advantages of different approaches to ensure the effective functioning of the swarm in a dynamic combat environment are substantiated. The results of the study can be used during the modernization of autonomous onboard control systems of unmanned aerial vehicles.*

**Keywords:** self-organization, natural systems, cyber-physical system, unmanned aerial vehicles, swarm applications, modeling, mathematical model, computational complexity.

## References

- [1.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, Air Force Vision 2035. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, 2020. (in Ukrainian)
- [2.] Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine, Air Force Development Strategy until 2035, Order. Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, Air Force Command, 2020. (in Ukrainian)
- [3.] "Cluster for the support of Defense Tech developments in Ukraine," Brave1. [Online]. Available: <https://brave1.gov.ua/>
- [4.] A. V. Trystan and D. I. Zhukov, "Models of self-organization of a team of homogeneous unmanned aerial vehicles in solving semi-formalized tasks," Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, no. 2(55), pp. 32–39, 2024, <https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.04>. (in Ukrainian)
- [5.] I. I. Shovkoshtnyi and O. A. Vasylenko, "Development of a logical-time model of swarm application of strike unmanned aerial vehicles taking into account typical methods of their group application in modern conditions," Collection of Scientific Works of the Center for Military Strategic Studies of the NDUU, no. 3(83), pp. 108–116, 2024, <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/108-116>. (in Ukrainian)
- [6.] I. I. Shovkoshtnyi and O. A. Vasylenko, "Mathematical model of the application of a swarm of strike unmanned aerial vehicles to engage non-stationary group targets using artificial intelligence elements," Air Power of Ukraine, no. 2(9), pp. 48–56, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-48-56>. (in Ukrainian)
- [7.] C. Gershenson, "Self-organizing systems: What, how, and why?," npj Complexity, no. 10, pp. 1–8, 2025, <https://doi.org/10.1038/s44260-025-00031-5>.
- [8.] F. Heylighen, "The science of self-organization and adaptivity," in The Encyclopedia of Life Support Systems, L. D. Kiel, Ed. Oxford, U.K.: EOLSS Publishers, 2003.
- [9.] O. A. Vasylenko, "Methods of mathematical modeling of the application of a swarm of strike unmanned aerial vehicles," Air Power of Ukraine, no. 1(8), pp. 54–70, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-54-70>. (in Ukrainian)
- [10.] "Bionics," Encyclopedia of Modern Ukraine. [Online]. Available: <https://esu.com.ua/article-35330>
- [11.] Transactions on Cyber-Physical Systems. [Online]. Available: <https://surl.li/qrcvww>
- [12.] N. M. Berezna and V. S. Bilokopytova, "Self-organization of complex systems," in Proc. Internet Conf. Domestic Geographical Science: Theory and Practice, Kharkiv, Ukraine, Nov. 12, 2016, pp. 34–46. (in Ukrainian)
- [13.] "People as liquid: What is active matter and how does it explain the physics of life?," Nauka.ua. [Online]. Available: <https://nauka.ua/article/aktivna-materiya> (in Ukrainian)
- [14.] "Swarm algorithms." [Online]. Available: <https://surl.li/hluxsa>
- [15.] I. Berizka and I. Karbovnyk, "Mathematical model of the modified artificial potential fields method using the Laplace function for real-time obstacle avoidance," Applied Problems of Computer Science, Security and Mathematics, no. 3, pp. 12–22, 2024. (in Ukrainian)
- [16.] E. V. Kuliev, A. A. Lezhebokov, and Y. A. Kravchenko, "A swarm algorithm for search engine optimization based on bat behavior modeling." [Online]. Available: <https://surl.li/xiiijj>.

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-117-121**

**УДК 355.45**

**Горбенко Володимир Михайлович** (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-7030-0995>

**Ікаєв Дмитро Русланович** (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-3501-0642>

**Кіреєнко Володимир Володимирович** (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-0230-9450>

**Дзюбенко Юрій Анатолійович** (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-6213-6905>

**Національний університет оборони України, Київ, Україна**

*Рукопис надійшов до редакції: 02.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 12.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ БОЙОВИХ ПОТЕНЦІАЛІВ РІЗНОТИПНИХ БПЛА ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РІЗНОРІДНИХ БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ**

*У статті запропоновано методологію визначення бойових потенціалів різнотипних БпЛА під час виконання різнорідних бойових завдань. Досвід війни за Незалежність України свідчить, що застосування БпЛА дозволяє вирішувати з високою ефективністю широкий спектр бойових та спеціальних завдань. Тактика застосування безпілотної літальної апаратури постійно адаптується та змінюється. З'явилися нові способи застосування. З метою здійснення ефективного завчасного планування застосування підрозділів, озброєних різнотипними БпЛА для виконання різнорідних завдань в операціях (бойових діях) сил оборони, необхідно провести аналіз та оцінювання усіх ймовірних завдань, які можуть вирішуватися за допомогою БпЛА та визначити спроможності підрозділів. Пріоритетність кожного конкретного завдання визначається за допомогою методів експертних оцінок та факторного аналізу, що дає можливість обґрунтувати застосування різнорідних БпЛА з різними бойовими можливостями. Запропонований методологічний підхід дозволяє розраховувати потрібну кількість БпЛА різних типів у складі підрозділів, їх бойовий потенціал, з урахуванням бойових можливостей БпЛА при виконанні різноманітних завдань.*

***Ключові слова:** факторний аналіз, бойовий потенціал, ефективність, безпілотної літальної апаратури, коефіцієнт важливості, пріоритетність.*

### **Вступ**

Досвід відкритої збройної агресії російської федерації проти України свідчить, що сучасний етап розвитку авіації характеризується створенням комплексів безпілотної літальної апаратури (БпЛА) різного функціонального призначення та безперервним розширенням їхньої номенклатури.

Сучасні операції (бойові дії) набули ознак дроноцентричності, що спричинено стрімким розвитком БпЛА та їх потенційними перевагами, насамперед за показником “ефективність-вартість”, як у порівнянні з пілотованими авіаційними комплексами, так і з іншими видами озброєнь та військової техніки [1-4].

Безпілотної літальної апаратури – це засоби, які можуть ефективно виконувати різноманітні завдання, як за метою, часом, так і за глибиною застосування. Тому задача обґрунтованого та раціонального вибору типу та потрібного наряду БпЛА для ефективного виконання конкретного бойового завдання є актуальною. В той же час, проблемним питанням є те, що методика оцінювання бойових можливостей різнотипних БпЛА з використанням бойових потенціалів (БП), які базуються на використанні методик визначення

БП для пілотованих літаків не знайшли належного застосування. Зазвичай, відомі методики визначення БП пілотованих літаків використовують методи експертних оцінок [5]. Це досить складний і тривалий процес, який вимагає залучення значної кількості експертів, які мають відповідні знання та компетентності, і в значній мірі не позбавлений проблем суб'єктивності та швидкого старіння (втрати достовірності з часом). Застосування подібних методів для великої кількості існуючих та перспективних БпЛА є проблематичним та складним для застосування на практиці. У зв'язку з цим, виникає потреба у пошуку нових підходів до визначення БП різнотипних БпЛА для виконання ними різноманітних бойових завдань з урахуванням високодинамічних умов сучасної війни.

### **Матеріали та методи**

Дана стаття є результатом теоретичних досліджень, які ґрунтуються на аналізі існуючих поглядів, наукових праць, діючих методик щодо визначення БП БпЛА [5-7] та синтезі пропозицій щодо їх удосконалення.

## Результати

Для Збройних Сил України, від початку проведення антитерористичної операції на Сході нашої держави у 2014 році і до завершення воєнного конфлікту між Вірменією та Азербайджаном у Нагорному Карабасі, пріоритетом розвитку безпілотної авіації були розвідувальні та розвідувально-ударні БпЛА. На той час основним завданням було виявлення об'єктів противника та корегування вогню артилерії [5]. З початком повномасштабного вторгнення російської федерації стало очевидно, що одних тільки розвідувальних БпЛА не достатньо для виконання усього різноманітного переліку завдань в інтересах наземних військ. Усі складові сил оборони України були вимушені самостійно шукати нові шляхи посилення інформаційної обізнаності в умовах динамічних бойових дій. Використання для ведення повітряної розвідки таких дешевих, доступних комерційних БпЛА, як “весільні дрони”, дозволило швидко адаптуватися та наростити спроможності передових підрозділів на полі бою в умовах переваги противника майже в усьому. В подальшому саме “весільні дрони” стали рішенням, яке дозволило компенсувати дефіцит у силах та засобах вогневого ураження. Так звані “гаражні рішення” щодо переобладнання їх в ударні (скиди, “дрони-камікадзе”) для безпосереднього ураження живої сили та озброєння і військової техніки стало тим самим “game changer”, що змінило не тільки сучасне поле бою, а й війну в цілому. Ще до початку широкомасштабного вторгнення ПС ЗС України, за рахунок закупівель розвідувально-ударних БпЛА типу ТВ-2 (виробництва Туреччини) набули обмеженої спроможності оперативної та ефективно виконувати одночасно завдання з розвідки, цілевказівки та ураження виявлених об'єктів власними авіаційними засобами ураження БпЛА. Досвід війни за Незалежність України показав відставання класичної воєнної теорії від практики, яка сьогодні випереджає та ламає усі минулі самі сміливі проекти та передбачення воєнних експертів.

На сьогодні, використання БпЛА надає можливість, за відносно невеликих фінансових витрат, ефективно реалізувати поставлені завдання, що раніше потребували залучення пілотованої авіації та значної кількості висококваліфікованого дороговартісного льотного складу.

Основні завданнями, які вирішувалися БпЛА:

ведення повітряної розвідки;

корегування (цілевказання) вогню артилерії (систем високоточної зброї);

ураження об'єктів противника власними засобами авіаційного ураження;

спеціальні завдання (використання в якості хибних цілей, ретрансляції зв'язку, постановка завад та РЕБ, пошуково-рятувальні операції тощо) [2-4].

Під час триваючої війни за Незалежність України тактика БпЛА почала адаптуватися та

змінюватися. З'явилися нові способи застосування такі як:

безпосереднє ураження БпЛА (таранний удар), оснащених бойовою частиною або іншими засобами ураження (наприклад РПГ-7), для знищення об'єктів противника (особового складу, ОВТ та інш.);

ураження об'єктів противника за допомогою “скидів” засобів ураження (бомбометання) (наприклад ВОГ-25, ручні гранати тощо).

Також розширився перелік завдань, а саме:

перехоплення засобів повітряного нападу противника (повітряний бій) (БпЛА різного призначення та навіть вертольотів);

повітряне перевезення (доставлення вантажів);

розмінування (мінування) місцевості.

Досвід війни за Незалежність України свідчить, що застосування БпЛА дозволяє вирішувати з високою ефективністю широкий спектр основних та спеціальних завдань.

З метою здійснення ефективного завчасного планування застосування різнотипних БпЛА для виконання різнорідних завдання в операціях (бойових діях) відповідно до обстановки, що склалася, необхідно провести узагальнення усіх ймовірних завдань, до виконання яких можуть залучатися БпЛА та визначити спроможності підрозділів озброєних різнотипними БпЛА.

Для ефективного виконання кожного конкретного завдання необхідно залучати БпЛА *i*-го типу. Узагальненою характеристикою бойових можливостей БпЛА є його бойовий потенціал (БП) [6, 10].

Існують декілька визначень бойового потенціалу. Наприклад:

Бойовий потенціал зразка озброєння – інтегральний показник, що характеризує максимальну сукупність виконаних зразком ОВТ завдань за цільовим призначенням при реалізації граничних тактико-технічних характеристик (ТТХ) за характерний час функціонування в типових розрахункових умовах [6].

Бойовий потенціал зразка озброєння – це інтегральний показник, який характеризує максимальний обсяг бойових завдань, що може виконати зразок озброєння за своїм функціональним призначенням у заданих (розрахункових) умовах застосування за час свого існування [6].

Загальним у цих визначеннях є те, що у якості характерного часу (комплексного показника), приймається конкретне значення часу існування зразка озброєння до його ураження (знищення). У випадку, якщо характерний час менше ніж час існування зразка, то БП визначається по суті вогневою продуктивністю або вогневою потужністю БпЛА. Проте, поняття “вогнева продуктивність” є показником лише однієї з властивостей БпЛА, а отже вужчим ніж “бойовий потенціал”, оскільки не враховує здатність БпЛА до виживання в умовах протидії противника, продовження функціонування та ін.

Бойовий потенціал з урахуванням виконання різномірних завдань (CP) є інтегральним показником та розраховується за формулою:

$$CP = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n D_{ji}, \quad (1)$$

де CP	–	інтегральний БП угруповання БпЛА;
m	–	кількість підрозділів (частин) БпЛА у складі угруповання $j=1 \dots m$ ;
n	–	кількість типів БпЛА у складі $j$ -го підрозділу (частини) $i=1 \dots n$ ;
$D_{ji}$	–	БП БпЛА $i$ -го типу $j$ -го підрозділу при виконанні $l$ -го завдання

$$D_{il} = CP_{il} \cdot k_l, \quad (2)$$

де $CP_{il}$	–	БП $i$ -го типу БпЛА при виконанні $l$ -го завдання;
k	–	показник пріоритетності $l$ -го завдання.

Ваговий коефіцієнт завдання  $p_l$  визначається відповідно до мети операції (бойових дій), замислу командувача (командира) та завдань підрозділів БпЛА (ведення повітряної розвідки, корегування вогню артилерії, авіаційна підтримка тощо), та умов обстановки, що склалася. Кожне із завдань має отримати свій ваговий коефіцієнт як частки сукупності усіх завдань підрозділів БпЛА в операції (бойових діях)

$$\sum_{l=1}^L p_l = 1, \quad (3)$$

де L	–	загальна кількість завдань підрозділів БпЛА в операції (бойових діях).
------	---	--

Визначення вагових коефіцієнтів завдань підрозділів БпЛА пропонується здійснювати за наступною методикою.

1. Під час планування застосування підрозділів БпЛА в операції (бойових діях) складається список усіх завдань які будуть виконуватися із застосуванням БпЛА.

2. Ваговий коефіцієнт визначається рішенням командувача (командира) або за допомогою методу експертних оцінок. Зазвичай,  $p_l = 0,1 \dots 0,9$ .

3. Показник ефективності пропонується визначати за допомогою методу факторного аналізу за критеріями оцінювання  $l$ -го завдання, а саме (варіант) [7, 9, 11]:

а) час необхідний для виконання завдання ( $t$ )

$$t \rightarrow \min;$$

б) ефективність виконання завдання: імовірність виявлення об'єкта противника ( $P_{\text{виявл}}$ ), імовірність ураження об'єкта противника ( $P_{\text{ураж}}$ )

$$P_{\text{виявл}} \cdot P_{\text{ураж}} \rightarrow \max;$$

в) імовірність подолання системи ППО ( $Q_{\text{ППО}}$ ) та системи РЕБ ( $Q_{\text{РЕБ}}$ ) противника

$$Q_{\text{ППО}} \text{ та } Q_{\text{РЕБ}} \rightarrow \max;$$

г) вартість БпЛА ( $C_{\text{БпЛА}}$ )

$$C_{\text{БпЛА}} \rightarrow \min;$$

е) технічна надійність (справність) БпЛА ( $R_{\text{БпЛА}}$ )

$$R_{\text{БпЛА}} \rightarrow \max;$$

ф) кратність використання БпЛА ( $N_{\text{БпЛА}}$ )

$$N_{\text{БпЛА}} \rightarrow \max.$$

4. Визначається показник пріоритетності завдання:

$$k_l = p_l \cdot n_l. \quad (4)$$

Значення показників пріоритетності завдань заносяться до табл. 1.

Таблиця 1

#### Визначення пріоритетності завдань БпЛА

№ з/п	Перелік завдань	Вагов. коеф.	Показник ефективності	Показник пріоритетності
1	$S_1$	$p_1$	$n_1$	$k_1$
...	...	...	...	...
$l$	$S_l$	$p_l$	$n_l$	$k_l$
...	...	...	...	...
$L$	$S_L$	$p_L$	$n_L$	$k_L$

Визначений перелік завдань (табл. 1) ранжується згідно отриманих значень показників пріоритетності від максимального до мінімального.

Для якісної інтерпретації результатів оцінювання пропонується застосовувати функцію бажаності Харрінгтона, що дозволяє здійснити градацію ступеня впливу чинників на інтегральний показник ефективності (табл. 2) [12].

Таблиця 2

#### Інтервальна шкала ступеню впливу чинників за Харрінгтоном

Ступінь впливу чинника	Інтервал бажаності, $d$
вирішальний	$0,80 \leq d \leq 1,00$
сильний	$0,63 \leq d < 0,80$
помірний	$0,37 \leq d < 0,63$
слабкий	$0,20 \leq d < 0,37$
не значний	$0 \leq d < 0,20$

Отриманні результати оцінювання дозволять визначити, які саме часткові показники мають найбільший вплив на інтегральний показник ефективності. Дані чинники, відносять до групи з вирішальним та сильним ступенем впливу. Чинники з помірним впливом потребують коригування залежно від умов застосування, тоді, як чинники зі слабким і практично відсутнім впливом можуть розглядатися як другорядні.

#### Обговорення

Запропонований методологічний підхід дозволяє розраховувати потрібну кількість (ресурс) БпЛА різних типів у складі підрозділів з урахуванням їх бойового потенціалу – ефективності виконання сукупності усіх завдань підрозділів БпЛА в

операції (бойових діях). Перевагою даного підходу є те, що застосування методу факторного аналізу дає можливість отримати кількісну оцінку для обґрунтування вибору варіанту комплектування підрозділів різнотипними БПЛА, а також скоротити час підготовки пропозицій на етапі планування операцій (бойових дій). Недоліком запропонованого методологічного підходу є те, що застосування методу експертних оцінок для визначення вагових коефіцієнтів завдань не в повній мірі усуває суб'єктивізм та залежить від проінформованості, досвіду, навченості та компетентності експертів.

### Висновки

В статті запропонований методологічний підхід до визначення БП різнотипних БПЛА для виконання різнорідних завдань. Цей підхід доречно використовувати на етапі планування застосування підрозділів БПЛА в операціях (бойових діях) органами військового управління (частин, угруповань) для обґрунтування необхідної кількості (ресурсу) БПЛА кожного конкретного типу у складі підрозділів БПЛА з метою ефективного виконання сукупності різнорідних завдань в операцій (бойових діях), а також для оцінювання кількісно-якісного співвідношення сил безпілотних систем сторін.

### Список використаних джерел

- [1.] О. Коршець та В. Горбенко, "Уроки застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні," *Повітряна міць України*, т. 1, № 4, с. 9–17, 2023, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>.
- [2.] О. О. Олексенко, Г. В. Місюк та В. М. Коршок, "Основні тенденції застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні," *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 3(21), с. 99–105, 2024, <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.12>.
- [3.] О. О. Олексенко, О. М. Гук, Д. Р. Ікаєв та В. В. Сніцаренко, "Щодо особливостей бойового застосування FPV-дронів у війні між росією та Україною," *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 4(22), с. 99–105, 2024, <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.12>.
- [4.] О. О. Олексенко, О. М. Гук, В. В. Сніцаренко, Д. Р. Ікаєв та О. М. Сніцаренко, "Ключові риси бойового застосування безпілотних літальних апаратів збройними силами російської федерації проти України у 2024 році," *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, № 2(8), с. 57–63, 2025, <https://doi.org/10.37701/ts.08.2025.06>.
- [5.] В. В. Герасименко, Я. М. Ярошенко та Д. Р. Ікаєв, "Досвід застосування безпілотної авіації у Вірмено-Азербайджанському конфлікті восени 2020р. уроки для України," *Воєнно-історичний вісник*, т. 4, № 2, с. 53–71, 2021, <https://doi.org/10.33099/2707-1383-2021-40-2-53-17>.
- [6.] D. Ikaiev, Y. Yaroshenko, A. Shalyhin, V. Nerubatskyi, and V. Bondar, "Methodical approach to the development of a mathematical model for calculating the combat potentials of impact unmanned aircraft," in *Proc. Інформаційна безпека та інформаційні технології*, Харків – Одеса, Україна, 2021, с. 74–79.
- [7.] М. М. Алексеев, "Методика кількісної оцінки ризиків із застосуванням онтології факторного аналізу інформаційних ризиків," *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень*, № 2(69), с. 98–106, 2020.
- [8.] Б. Шкурат та Д. Резнік, "Експрес-оцінювання варіантів організації взаємодії засобів протиповітряної оборони з літальними апаратами," *Повітряна міць України*, № 1(6), с. 105–111, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-105-111>.
- [9.] *Метод експертних оцінок у військових дослідженнях: навч. посіб.* Київ, Україна: НУОУ, 2018.
- [10.] *Оцінювання ефективності застосування озброєння та військової техніки: монографія.* Київ, Україна: Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, 2019.
- [11.] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- [12.] Я. В. Лісун та Д. А. Макадьора, "Функція Харінгтона як інструмент визначення рівня розвитку технологій," *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Економічні науки*, № 6(105), с. 80–85, 2016.
- [13.] U.S. Department of Defense, *Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2013-2038*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://archive.defense.gov/pubs/dod-usrm-2013.pdf>
- [14.] U.S. Air Force, *United States Air Force Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://fas.org/irp/program/collect/uas\\_2009.pdf](https://fas.org/irp/program/collect/uas_2009.pdf)
- [15.] U.S. Air Force, *The United States Air Force Remotely Piloted Aircraft Vector: Vision and Enabling Concepts: 2013-2038*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://www.af.mil/Portals/1/documents/news/USAFR\\_PAVectorVisionandEnablingConcepts2013-2038.pdf](https://www.af.mil/Portals/1/documents/news/USAFR_PAVectorVisionandEnablingConcepts2013-2038.pdf)
- [16.] U.S. Department of Defense, *Small Unmanned Aircraft Systems Flight Plan: 2016-2036*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/wp-content/uploads/airforce/SUAS\\_FlightPlanSigned.pdf](https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/wp-content/uploads/airforce/SUAS_FlightPlanSigned.pdf)

**Volodymyr Horbenko** (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-7030-0995>

**Dmytro Ikaiev** (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-3501-0642>

**Volodymyr Kireienko** (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-0230-9450>

**Yurii Dziubenko** (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-6213-6905>

*National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE COMBAT POTENTIAL OF DIFFERENT TYPES OF UAVs WHEN PERFORMING VARIOUS COMBAT TASKS

*The article proposes a methodology for determining the combat capabilities of different types of UAVs when performing various combat tasks. The experience of Russia and Ukraine shows that the use of UAVs allows for the highly effective completion of a wide range of combat and special tasks. The tactics for using unmanned aerial vehicles are constantly being adapted and changed. New methods of use have emerged, such as: direct destruction of enemy targets (ramming); striking enemy targets with "drops" (bombing); intercepting enemy air attack vehicles (air combat); air transportation (delivery of cargo); remote mining/demining of terrain. In order to effectively plan in advance the use of units armed with different types of UAVs to perform various tasks in defense force operations (combat actions), it is necessary to analyze and evaluate all possible tasks that can be solved with the help of UAVs and determine the capabilities of the units. The priority of each specific task is determined using expert assessment and factor analysis methods, which makes it possible to justify the use of different types of UAVs with different combat capabilities. The proposed methodological approach allows calculating the required number of different types of UAVs in units, their combat potential, taking into account the combat capabilities of UAVs when performing various tasks.*

**Keywords:** factor analysis, combat potential, planning, efficiency, unmanned aerial vehicle, importance coefficient, priority.

### References

- [1.] O. Korshets and V. Horbenko, "Lessons from the use of unmanned aerial vehicles in the russian-Ukrainian war," *Air Power of Ukraine*, vol. 1, no. 4, pp. 9–17, 2023, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17> (in Ukrainian)
- [2.] O. O. Oleksenko, H. V. Misiuk, and V. M. Korshok, "Main trends in the use of unmanned aerial vehicles in the russian-Ukrainian war," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 3(21), pp. 99–105, 2024, <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.21.2024.12> (in Ukrainian)
- [3.] O. O. Oleksenko, O. M. Huk, D. R. Ikaiev, and V. V. Snitsarenko, "Regarding the features of combat employment of FPV drones in the war between russia and Ukraine," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 4(22), pp. 99–105, 2024, <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.12> (in Ukrainian)
- [4.] O. O. Oleksenko, O. M. Huk, V. V. Snitsarenko, D. R. Ikaiev, and O. M. Snitsarenko, "Key features of the combat employment of unmanned aerial vehicles by the armed forces of the russian federation against Ukraine in 2024," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 2(8), pp. 57–63, 2025, <https://doi.org/10.37701/is.08.2025.06> (in Ukrainian)
- [5.] V. V. Herasymenko, Ya. M. Yaroshenko, and D. R. Ikaiev, "Experience of using unmanned aviation in the Armenian-Azerbaijani conflict in the fall of 2020: Lessons for Ukraine," *Military Historical Bulletin*, vol. 4, no. 2, pp. 53–71, 2021, <https://doi.org/10.33099/2707-1383-2021-40-2-53-17> (in Ukrainian)
- [6.] D. Ikaiev, Y. Yaroshenko, A. Shalyhin, V. Nerubatskyi, and V. Bondar, "Methodical approach to the development of a mathematical model for calculating the combat potentials of impact unmanned aircraft," in *Proc. Information Security and Information Technologies*, Kharkiv–Odesa, Ukraine, 2021, pp. 74–79.
- [7.] M. M. Aleksieiev, "Methodology of quantitative risk assessment using the ontology of factor analysis of information risks," *Collection of Scientific Works of the Center for Military Strategic Studies*, no. 2(69), pp. 98–106, 2020. (in Ukrainian)
- [8.] B. Shkurat and D. Rieznic, "Express-assessment of options for organizing the interaction of air defense means with aerial vehicles," *Air Power of Ukraine*, no. 1(6), pp. 105–111, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-105-111> (in Ukrainian)
- [9.] *Method of Expert Assessments in Military Research: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: NDUU, 2018. (in Ukrainian)
- [10.] *Assessment of the Effectiveness of the Employment of Armament and Military Equipment: Monograph*. Kyiv, Ukraine: Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 2019. (in Ukrainian)
- [11.] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- [12.] Ya. V. Lisun and D. A. Makatora, "Harrington's function as a tool for determining the level of technology development," *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series: Economic Sciences*, no. 6(105), pp. 80–85, 2016. (in Ukrainian)
- [13.] U.S. Department of Defense, *Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2013-2038*. [Online]. Available: <https://archive.defense.gov/pubs/dod-usrm-2013.pdf>
- [14.] U.S. Air Force, *United States Air Force Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047*. [Online]. Available: [https://fas.org/irp/program/collect/uas\\_2009.pdf](https://fas.org/irp/program/collect/uas_2009.pdf)
- [15.] U.S. Air Force, *The United States Air Force Remotely Piloted Aircraft Vector: Vision and Enabling Concepts: 2013-2038*. [Online]. Available: <https://www.af.mil/Portals/1/documents/news/USAFRP/AVectorVisionandEnablingConcepts2013pdf>
- [16.] U.S. Department of Defense, *Small Unmanned Aircraft Systems Flight Plan: 2016-2036*. [Online]. Available: [https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/wp-content/uploads/airforce/SUAS\\_FlightPlanSigned.pdf](https://defenseinnovationmarketplace.dtic.mil/wp-content/uploads/airforce/SUAS_FlightPlanSigned.pdf)

## ЛОГІСТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПІДТРИМКА ДІЙ ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-121-130**

**УДК 623.7:658.5**

**Ков'ях Іван Вікторович**

<https://orcid.org/0009-0008-3541-5616>

**Дранник Павло Анатолійович** (кандидат військових наук, старший науковий співробітник)

<https://orcid.org/0000-0002-6073-2962>

**Білявський Богдан Анатолійович** (кандидат військових наук)

<https://orcid.org/0009-0006-9036-7229>

*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 19.02.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 22.03.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

### МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕМОНТУ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ В ХОДІ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

*Ремонт озброєння та військової техніки сил і засобів протиповітряної оборони є однією з ключових складових забезпечення боєздатності угруповання в умовах ведення сучасних бойових дій. Інтенсивність застосування засобів повітряного нападу, постійна модернізація та ускладнення зразків озброєння, їх різноманітність, а також висока динаміка ведення бойових дій, вимагають прийняття своєчасного та обгрунтованого рішення щодо організації та проведення ремонтно-відновлювальних робіт на пошкоджених зразках озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ. За таких умов наявність обгрунтованого науково-методичного апарату оцінювання ефективності ремонту озброєння та військової техніки набуває першочергового значення. Водночас аналіз існуючих методик оцінювання ефективності ремонту озброєння та військової техніки свідчить, що вони не в повній мірі враховують комплексний характер ремонту, реальні можливості ремонтно-відновлювальних органів, рівень підготовленості їх особового складу та специфіку умов ведення бойових дій.*

*Метою дослідження є удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту озброєння та військової техніки протиповітряної оборони під час виконання завдань у ході ведення бойових дій. Запропонована методика, на відміну від існуючих, ґрунтується на комплексному врахуванні організаційних, технічних і кадрових чинників, зокрема рівні реальної навченості особового складу ремонтних органів, рівня їх технічно-логістичної готовності й забезпеченості необхідною технічною та експлуатаційною документацією, умов ведення бойових дій. Це надає можливість підвищити достовірність оцінювання ефективності ремонту та обгрунтувати управлінські рішення щодо вибору варіантів ремонту озброєння та військової техніки з урахуванням конкретних умов бойової обстановки. Отримані результати можуть бути використані відповідними органами управління під час планування застосування логістики в ході бойових дій військових частин (підрозділів) Повітряних Сил Збройних Сил України, а також під час подальших досліджень з питань організації ремонту озброєння та військової техніки.*

***Ключові слова:** оцінювання ефективності, ремонт озброєння та військової техніки, протиповітряна оборона, середній час ремонту, ремонтно-відновлювальні органи.*

#### **Вступ**

Досвід російсько-української війни та сучасних збройних конфліктів, переконливо свідчать про те, що одним із визначальних чинників збереження боєздатності озброєння та військової техніки (ОВТ) протиповітряної оборони (ППО) є ефективне здійснення такої функції логістичного забезпечення, як технічна експлуатація та ремонт (відновлення) ОВТ. В умовах масованого застосування противником авіаційних засобів ураження та різноманітного ракетного озброєння, вирішального значення набуває можливість виконання своєчасного ремонту озброєння і

військової техніки протиповітряної оборони України.

Зенітні ракетні війська (ЗРВ) Повітряних Сил Збройних Сил України є основою системи протиповітряної оборони держави та виконують завдання в умовах постійного вогневого впливу противника, маневрування вогневими підрозділами та обмеженості ремонтних ресурсів. Втрата працездатного стану, навіть окремих зразків зенітних ракетних комплексів зі складу угруповань зенітних ракетних військ або їх складових, призводить до зниження рівня бойового потенціалу угруповання ЗРВ в цілому, що безпосередньо

впливає на стійкість системи протиповітряної оборони та результати бойових дій.

Особливої складності набуває організація ремонту ОВТ в угрупованнях ЗРВ змішаного складу, де одночасно експлуатуються зразки озброєння різного типу, технічного стану та стандартів забезпечення. У цих умовах ефективність ремонту визначається не лише технічними характеристиками зразків ОВТ, а й реальними можливостями ремонтно-відновлювальних органів (РВО), рівнем підготовленості ремонтного персоналу, наявністю технічної документації, інструментів і матеріалів, а також часовими обмеженнями, які зумовлені інтенсивністю ведення бойових дій.

Питання оцінювання ефективності ремонту ОВТ у системі технічного забезпечення Збройних Сил України знайшли відображення у наукових працях та навчально-методичних виданнях НУОУ [1,2,3], дослідженнях з питань удосконалення методик оцінювання систем відновлення [4,5], роботах щодо розвитку системи технічного обслуговування і ремонту сучасних зенітних ракетних комплексів [6], а також у нормативно-доктринальних документах з логістичного та технічного забезпечення [7,8,9,10].

Теоретичною основою дослідження є положення щодо організації експлуатації та ремонту озброєння і військової техніки зенітних ракетних військ [11], де системно розкрита структура технічного забезпечення засобів ЗРВ, види та рівні ремонту ОВТ, порядок функціонування ремонтних органів та визначені показники оцінювання ефективності їх діяльності.

Загальні закономірності функціонування системи матеріально-технічного забезпечення військ (сил), принципи побудови логістичних підсистем, а також методологічні підходи до оцінювання їх ефективності базуються на положеннях, викладених у [12].

Сучасний стан, склад та особливості застосування засобів протиповітряної і протиракетної оборони Сил оборони України, що безпосередньо впливають на організацію технічного забезпечення та відновлення ОВТ, розглянуті у [13], що дозволяє врахувати специфіку новітніх зразків озброєння при формуванні підходів до оцінювання ефективності їх ремонту.

У [14-19] розглянуті питання організації експлуатації та ремонту ОВТ ЗРВ, формування вимог до зразків озброєння, побудови системи логістичного забезпечення, визначення показників функціонування систем матеріально-технічного забезпечення, а також узагальнений досвід застосування сил та засобів ППО у російсько-українській війні.

Водночас аналіз результатів проведених досліджень, які висвітлені у зазначених джерелах свідчить про те що більшість робіт зосереджена або на організаційно-структурних аспектах системи технічного забезпечення, або на окремих методиках оцінювання ефективності відновлення ОВТ, або на узагальненні бойового досвіду без

формалізованого поєднання його з кількісними показниками ефективності ремонту.

Таким чином, зберігається науково-практична невідповідність між комплексним оцінюванням ефективності ремонту ОВТ і реальними умовами сучасних бойових дій, яка обумовлює необхідність подальшого вдосконалення відповідного науково-методичного апарату.

Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена наявністю науково-практичного протиріччя між потребою у достовірному оцінюванні ефективності ремонту ОВТ ППО у бойових умовах і обмеженими можливостями існуючого науково-методичного апарату. Для вирішення цього протиріччя виникає необхідність удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту ОВТ з урахуванням комплексу технічних, організаційних і кадрових чинників.

Метою дослідження є удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту ОВТ ППО під час виконання завдань з протиповітряної оборони в ході ведення бойових дій.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що врахування умов ведення бойових дій, реальної підготовленості ремонтного персоналу, рівня готовності ремонтних органів і наявності відповідної документації при визначенні часу та результативності ремонтних робіт дозволить підвищити достовірність оцінювання ефективності ремонту ОВТ і, як наслідок, забезпечити рівень боєздатності ОВТ ППО, який вимагається.

Основними припущеннями дослідження є те що: ефективність ремонту ОВТ ППО у ході ведення бойових дій визначається не лише технічними характеристиками зразків ОВТ, а й сукупністю організаційних, кадрових та ресурсних чинників; час проведення ремонтних робіт є інтегральним показником, який більш повно відображає результативність функціонування РВО у бойових умовах; умови ведення бойових дій, рівень навченості ремонтного персоналу, забезпеченість технічною документацією та інструментами суттєво впливають на продуктивність РВО та тривалість ремонту; використання удосконаленої методики оцінювання ефективності ремонту з урахуванням зазначених чинників дозволяє обґрунтовано визначати виробничі спроможності РВО та приймати раціональні рішення щодо вибору варіантів ремонту з метою підтримання боєздатності сил і засобів ППО.

### Матеріали та методи

У ході дослідження застосована сукупність загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, які забезпечили досягнення поставленої мети та розв'язання визначених завдань.

Для дослідження процесу ремонту ОВТ ППО, як складової системи логістичного забезпечення, встановлення взаємозв'язків між технічними, організаційними та кадровими чинниками, які впливають на його ефективність, застосований метод системного аналізу.

Експертний метод застосований для визначення вагових коефіцієнтів показників ефективності ремонту та оцінювання значущості окремих факторів у забезпеченні боєздатності угруповання [20].

Графоаналітичний метод застосований для візуалізації результатів дослідження та аналізу залежностей між основними параметрами, які характеризують ефективність ремонту, з метою обґрунтування практичних рекомендацій щодо її підвищення.

### Результати

Для досягнення мети дослідження, на основі результату аналізу факторів, які впливають на ефективність ремонту ОБТ угруповання ЗРВ змішаного складу під час виконання завдань з ППО в ході ведення бойових дій, потребують вирішення наступні завдання:

проведення аналізу існуючого науково-методичного апарату дослідження ефективності ремонту ОБТ ЗРВ;

удосконалення методики оцінювання ефективності ремонту ОБТ ЗРВ;

обґрунтування рекомендацій щодо підвищення ефективності ремонту ОБТ угруповання ЗРВ змішаного складу під час виконання завдань з протиповітряної оборони в ході ведення бойових дій.

Аналіз існуючих методик оцінювання ефективності ремонту ОБТ ЗРВ дозволяє зробити висновок, що існуючий науково-методичний апарат потребує доопрацювання для забезпечення можливості оцінювання ефективності ремонту ОБТ з урахуванням реальної навченості ремонтного персоналу, готовності до проведення робіт, наявності технічної документації в умовах ведення бойових дій. Такий підхід до визначення часу проведення відновлювального ремонту характеризується більш високою достовірністю розрахунків та вибором оптимального, в конкретних умовах обстановки, варіанту здійснення ремонту пошкоджених зразків ОБТ для забезпечення боєздатності угруповання.

Таблиця 1

**Таблиця відповідності ступеня бойових пошкоджень ОБТ складу сил та засобів, необхідних для ремонту та очікуваний час ремонту**

Пошкодження ОБТ	Стан бойової готовності ОБТ	Склад сил і засобів, необхідних для ремонту	Очікуваний час ремонту
Слабкі	Часткова втрата бойової готовності	Бойові розрахунки підрозділів з використанням одиночного і групового комплексу ЗПП	До 3 діб
Середні	Втрата бойової готовності	Військові ремонтні органи (майстерні частин, з'єднань, ремонтно-відновні бригади частин, з'єднань, виїзні ремонтні бригади ремонтних підприємств (підприємств – виробників) із використанням ремонтного і групового комплектів ЗПП	10 – 20 діб
Сильні		Стаціонарні ремонтні бази та підприємства, підприємства промисловості із використанням ремонтного відновлювального комплексу ЗПП	40 – 60 діб
Повне руйнування	Ремонт економічно недоцільний		

Кількісним показником оцінювання рівня пошкоджень зразка ОБТ угруповання ЗРВ змішаного складу є середні очікувані трудовитрати  $H$  на відновлення (ремонт) зразка ОБТ ЗРВ, які розраховуються за формулою:

$$H_{ij} = \sum_i \sum_j \sum_{ij} \quad (1)$$

де  $H_{ij}$  – середні очікувані трудовитрати (у людино-годинах) на відновлення (ремонт)  $i$ -го структурного елемента засобу ЗРК від впливу засобів ураження  $j$ -го типу.

Розрахована величина  $H_{ij}$  порівнюється з граничними значеннями трудовитрат на ремонт зразка ОБТ для кожного значення ознаки ступеню пошкоджень та на підставі результатів такого порівняння приймається рішення про очікуваний рівень пошкоджень зразка ОБТ.

Ефективність застосування угруповання ЗРВ змішаного складу в ході ведення бойових дій безпосередньо залежить від постійного підтримання ОБТ в готовності до виконання визначених завдань [9].

Підвищення ефективності ремонту ОБТ угруповання ЗРВ змішаного складу передбачає оптимальне використання сил і засобів РВО, зокрема, скорочення часу на переміщення, розгортання та згортання рухомих засобів технічного обслуговування і ремонту (РЗТОіР), удосконалення організаційних робіт і посилення інформаційної підтримки технологічних процесів. Основою для визначення напрямів удосконалення є своєчасна та об'єктивна оцінка ефективності ремонту [11].

Аналіз досвіду застосування РВО в ході повномасштабної агресії російської федерації проти України свідчить, що одними з

найважливіших чинників результативності ремонту є професійна підготовка особового складу та належне матеріально-технічне забезпечення, передусім, оснащення сучасними рухомими засобами технічного обслуговування та ремонту [14-19]. У порівнянні з цим, впровадження нових організаційно-технічних рішень має другорядне значення.

Відповідність ступеня бойових пошкоджень ОВТ ППО, необхідних для ремонту та очікуваний час ремонту наведені у табл. 1 [12].

Таким чином, визначення ступеня пошкодження ОВТ передбачає оцінювання: стану бойової готовності ОВТ; складу сил і засобів, які необхідні для його ремонту; очікуваного часу ремонту.

На теперішній час у ЗС України в наявності обмежений запас ОВТ ППО, який необхідний для заміщення виведених з ладу одиниць ОВТ, з метою збереження бойового потенціалу угруповання ЗРВ змішаного складу. При цьому необхідно враховувати, що кожний засіб за одиницю часу здатний знищити в середньому  $C_1$  умовних бойових засобів противника, а кожен такий умовний засіб противника за одиницю часу може знищити в середньому  $C_2$  одиниць нашого ОВТ [1]. Якщо на ремонт ЗРК витрачається час простою (час проведення ремонту)  $t_{пр}$ , то у противника за цей період часу залишиться  $C_1 t_{пр}$  бойових засобів, які у той же час можуть спричинити збитки  $\Delta P_{пр}$  нашим військам у розмірі:

$$\Delta P_{пр} = C_1 t_{пр} C_2 t_{пр} = C_1 C_2 t_{пр}^2 \quad (2)$$

Таким чином, збитки, спричинені простоем не відремонтованої одиниці ОВТ, зростають пропорційно квадрату тривалості цього простою. Отже, вкрай важливо звести до мінімуму час ремонту (відновлення) непрацездатного зразка ОВТ (критично важливого для функціонування ЗРК).

Тому, у якості основного показника оцінювання ефективності ремонту доцільно обрати час проведення відновлювального ремонту:

$$T = \frac{1}{\Pi} \quad (3)$$

де  $\Pi$  – середньодобова продуктивність РВО, зразків на добу.

Враховуючи велике значення часу саме при відновленні ОВТ (що, у свою чергу, залежить від продуктивності РВО), пропонується ввести коефіцієнт придатності до проведення ремонтних робіт  $K_{прд}$ , який визначається як добуток часткових, рівнозначних складових. Припускаючи, що  $K_{прд} \in [0;1]$ , то величина кожного з його складових матиме значення від 0 до 1, в залежності від оцінки кожної окремої складової, де 0 – зразок ОВТ повністю не придатний виконувати завдання, а 1 – зразок ОВТ спроможний виконати завдання в повному обсязі за визначений час. Отже, враховуючи дане припущення отримаємо вираз:

$$K_{прд} = K_{тех} K_{гот.о/с+док} \quad (4)$$

де  $K_{тех}$  – коефіцієнт технічної готовності до проведення ремонту, який враховує наявність відповідних інструментів та матеріалів необхідних для проведення робіт, тобто:

$$K_{тех} = \frac{M_{наявн}}{M_{необх}} \quad (5)$$

де  $M_{наявн}$  – наявна кількість відповідних інструментів та матеріалів необхідних для проведення робіт;

$M_{необх}$  – необхідна кількість відповідних інструментів та матеріалів необхідних для проведення робіт;

$K_{гот.о/с+док}$  – коефіцієнт готовності особового складу до проведення ремонту та наявність відповідної документації (технологічні карти, схеми, інструкції і т.п.), який можна розрахувати як:

$$K_{гот.о/с+док} = \frac{K_{навч} + K_{інф}}{2} \quad (6)$$

де  $K_{навч}$  – коефіцієнт навченості особового складу (пропонується визначати згідно табл. 2), який розраховується як:

$$K_{навч} = \sum_{i=1}^m \frac{K_{навч.i}}{m}; \quad (7)$$

де  $m$  – кількість ремонтників даного РВО;

$K_{навч.i}$  – навченість  $i$ -го ремонтника даного РВО;

Таблиця 2

Таблиця визначення коефіцієнту навченості особового складу РВО

Критерій визначення $K_{навч}$	Значення $K_{навч}$
Має базову освіту.	0,1
Має освіту за спорідненою спеціальністю і не має досвіду у проведенні ремонтних робіт, що відповідає отриманим пошкодженням, або має базову освіту і має досвід у проведенні ремонтних робіт, що відповідає отриманим пошкодженням.	0,3
Має, профільну освіту і не має досвіду у проведенні ремонтних робіт, що відповідає отриманим пошкодженням, або має освіту за спорідненою спеціальністю і має досвід у проведенні ремонтних робіт, що відповідає отриманим пошкодженням.	0,5
Має, профільну освіту і має досвід у проведенні ремонтних робіт, що відповідає отриманим пошкодженням.	0,7
Має, профільну освіту і періодично (не рідше ніж 1 раз на півроку) приймає участь у проведенні ремонтних робіт, що відповідає отриманим пошкодженням.	0,9

$K_{\text{інф}}$  – коефіцієнт наявності відповідної документації (технологічні карти, схеми, інструкції і т.п.).  $K_{\text{інф}}$  є співвідношенням кількості наявної до кількості документації повного комплекту:

$$K_{\text{інф}} = \frac{D_{\text{наяв}}}{D_{\text{повн.к-т}}} \quad (8)$$

де  $D_{\text{наяв}}$  – кількість наявної документації (технологічні карти, схеми, інструкції і т.інш.);

$D_{\text{повн.к-т}}$  – кількість документації повного комплекту (технологічні карти, схеми, інструкції і т.п.) на зразок озброєння.

Таким чином, враховуючи (4) та (6), отримуємо:

$$K_{\text{прид}} = K_{\text{тех}} \frac{(K_{\text{навч}} + K_{\text{інф}})}{2} \quad (9)$$

На відміну від існуючих методик, у запропонованій додатково введено коефіцієнт умов виконання ремонтних робіт  $K_{\text{умов}}$  [0;1], який враховує вплив бойової обстановки на реальну продуктивність РВО.

Введення даного коефіцієнта дозволяє перейти від умовно-нормативної оцінки часу ремонту до оцінки, максимально наближеної до реальних умов ведення бойових дій.

Коефіцієнт умов  $K_{\text{умов}}$  пропонується визначити згідно табл. 3.

Таблиця 3  
Таблиця визначення коефіцієнту  $K_{\text{умов}}$  в залежності від умов проведення ремонту

Умови ремонту	$K_{\text{умов}}$
Стационарні, поза зоною ураження	1
Польові, з обмеженням маскуванн	0,8 – 0,9
Поблизу району бойових дій	0,6 – 0,7
Під загрозою повторного ураження	0,4 – 0,5
В умовах бойових дій підвищеної інтенсивності	≤0,3

$K_{\text{умов}}$  визначається сумою вагових коефіцієнтів, а саме:

- $K_{\text{загр}}$  – рівень загрози повторного ураження;
- $K_{\text{маск}}$  – обмеження, пов'язані з маскуванн
- $K_{\text{ман}}$  – інтенсивність маневру, зміну позиції;
- $K_{\text{пер}}$  – імовірність переривання робіт;
- $K_{\text{ніч}}$  – обмеження нічного режиму.

Значення та розподіл вагових коефіцієнтів в інтегральному показнику  $K_{\text{умов}}$  (рис. 1) визначені експертним шляхом на основі узагальненого досвіду ремонтних органів під час РУВ (російсько-української війни) та власного практичного досвіду у сфері технічного забезпечення і ремонту ОБТ [14-19].

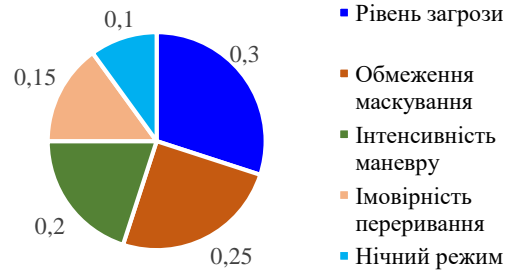


Рисунок 1 – Розподіл вагових коефіцієнтів в інтегральному показнику  $K_{\text{умов}}$

Вважаємо, що середньодобова продуктивність РВО розраховується як:

$$\Pi = \frac{\Phi \cdot K_{\text{прид}}}{H} \quad (10)$$

де  $\Phi$  – середньодобова величина дійсного фонду робочого часу даного РО, люд.-год/добу;

$H$  – величина трудомісткості певного виду ремонту зразка ОБТ, що проводиться в даному РО, люд.-год/зразк

Середньодобова величина дійсного фонду робочого часу одного РВО, вимірювана протягом доби його роботи, дорівнює:

$$\Phi = n^0 t_p \quad (11)$$

де  $n^0$  – кількість спеціалістів-ремонтників в даному РВО;

$t_p$  – робочий час у годинах на добу.

Величина часу, витраченого на проведення певного виду ремонту зразка ОБТ, розраховується:

$$T = \frac{1}{\Pi} \quad (12)$$

Таким чином, враховуючи  $K_{\text{умов}}$  та (12), (11), (10), (9) отримуємо:

$$T_{\text{рем}} = \frac{2H}{n^0 t_p K_{\text{тех}} (K_{\text{навч}} + K_{\text{інф}}) K_{\text{умов}}} \quad (13)$$

У якості критерія доцільно обрати відповідність часу ремонту пошкоджених зразків ОБТ ( $T_{\text{рем розр}}$ ) до рівнів визначених у табл. 1 ( $T_{\text{рем потр}}$ ).

Таким чином, методика дозволяє обрати найбільш доцільний варіант ремонту пошкодженого ОБТ ППО, враховуючи реальну навченість особового складу, рівень забезпеченості необхідними інструментами, матеріалами та документацією в умовах ведення бойових дій.

Ремонт пошкодженого ОБТ ППО під час ведення бойових дій полягає у приведенні його до працездатного стану. Враховуючи те, що на даний час РВО оперативного рівня фактично не сформовано, а можливості з виділення виїзних ремонтних бригад ремонтних підприємств обмежені, то, відповідно, на тактичний рівень покладається ремонт зразків ОБТ ЗРВ, які отримали слабкі та середні пошкодження.

Відповідно до табл. 1 очікуваний час відновлення не повинен перевищувати для слабких пошкоджень ОВТ – 3-х діб, а для середніх пошкоджень ОВТ – 20 діб.

Для розрахунків використано [11] прораховані середні та максимальні значення очікуваних трудовитрат на ремонт ЗРК середньої дальності, які зазначені у таблиці 4 та 5.

Таблиця 4

**Очікувані середні трудовитрати на ремонт ЗРК,**

**люд.-год**

Пошкодження ЗРК	ЗРК середньої дальності
Слабкі	500
Середні	2600

Таблиця 5

**Очікувані максимальні трудовитрати на ремонт ЗРК, люд.-год**

Пошкодження ЗРК	ЗРК середньої дальності
Слабкі	1000
Середні	4000

Таким чином, встановлена залежність тривалості проведення ремонту від низки чинників: умов району проведення ремонту, коефіцієнта технічної готовності до виконання ремонтних робіт; рівня підготовленості особового складу; забезпеченості необхідною технічною документацією (технологічними картами, схемами, інструкціями тощо); чисельності спеціалістів-ремонтників у складі РВО, а також тривалості їх робочого часу протягом доби.

Для визначення рекомендацій щодо підвищення ефективності ремонту ОВТ ППО обрано угруповання ЗРВ змішаного складу у складі ЗРК-1 та ЗРК-2. Під час виконання завдань з протиповітряної оборони в ході ведення бойових дій, необхідно проаналізувати залежність часу ремонту ОВТ від  $K_{навч}$ ,  $K_{тех}$ ,  $K_{інф}$ ,  $n^0$ ,  $t_p$ , з урахуванням умов проведення ремонту, з метою визначення напрямків підвищення ефективності ремонту ОВТ угруповання ЗРВ змішаного складу.

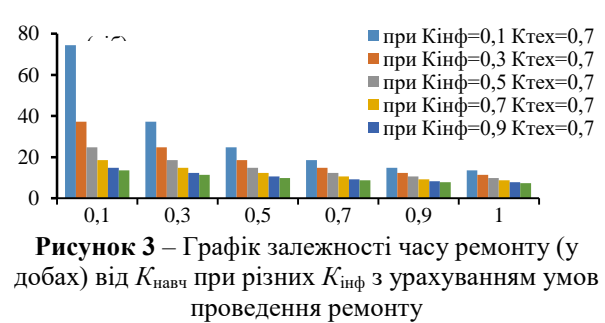
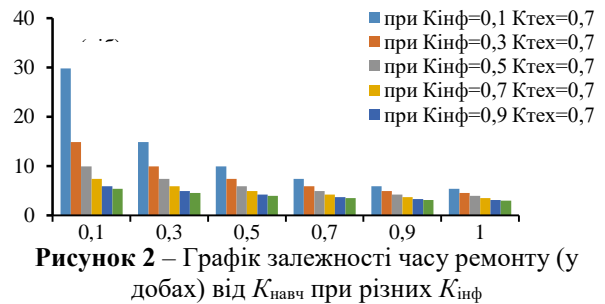
Аналіз проведений для слабких пошкоджень.

Графік залежності часу проведення ремонту від коефіцієнту навченості особового складу та коефіцієнту наявності відповідної документації зображено на рис. 2. Ці самі дані але з урахуванням умов проведення ремонту (для розрахунків обраний показник під загрозою повторного ураження), зображено на рис. 3.

Аналіз результатів, поданих на графіках, свідчить, що зростання значень коефіцієнтів  $K_{навч}$  та/або  $K_{інф}$  з інтервалом 0,2 призводить до суттєвого зменшення тривалості ремонтних робіт – у середньому на 25–50%, однак такий ефект спостерігається лише в діапазоні значень 0,1–0,7. За умови досягнення високих значень зазначених коефіцієнтів (0,8–1,0) подальше їх підвищення характеризується значно меншою ефективністю та забезпечує скорочення часу ремонту на 5–15%.

Врахування умов проведення ремонту призводить до суттєвого збільшення абсолютних значень часу ремонту порівняно з базовим

варіантом (рис. 2). Так, за низьких значень  $K_{навч}$  та  $K_{інф}$  час ремонту зростає в кілька разів, що відображає негативний вплив складних умов виконання робіт. Таким чином, другий графік характеризує більш напружений і реалістичний сценарій функціонування ремонтного органу.



Отже, врахування умов проведення ремонту не змінює загальних закономірностей впливу  $K_{навч}$  і  $K_{інф}$ , проте призводить до зростання часових витрат у абсолютному вимірі та надає можливість отримання більш реальної оцінки часу проведення ремонту. Це підтверджує, що навіть за ускладнених умов, ключовим чинником підвищення ефективності ремонту залишається рівень підготовки ремонтного персоналу, а заходи з його навчання та інформаційного забезпечення мають вирішальне значення для зменшення тривалості ремонтних робіт.

Аналіз результатів проведених розрахунків дозволяє визначити, що при низьких значеннях коефіцієнтів технічної готовності до проведення ремонту та (або) навченості особового складу, наявності відповідної документації (технологічні карти, схеми, інструкції і т.ін.) для зменшення часу проведення ремонтних робіт доцільно, за можливості, збільшувати саме їх, а при високих значеннях зазначених коефіцієнтів доцільно, за можливості, збільшувати кількість особового складу, який залучається до проведення ремонтних робіт.

**Обговорення**

Таким чином, аналіз факторів впливу на ремонт ОВТ та результати проведених розрахунків надають можливість визначення рекомендацій щодо підвищення ефективності ремонту ОВТ ППО, до яких слід віднести:

необхідність запровадження переводу технічної документації (технологічні карти, схеми, інструкції і т.ін.) до електронного вигляду, що дозволить значно підняти  $K_{інф}$  для всіх підрозділів, які мають на озброєнні ЗРК до початку ведення бойових дій,

а також надасть можливість підвищити  $K_{\text{інф}}$  без значних часових втрат у випадку втрати інформаційної складової внаслідок ведення бойових дій (завдяки можливості обміну електронними копіями між частинами і підрозділами, як за допомогою фізичних носіїв, так і з використанням технічних засобів зв'язку – мережі інтернет);

проведення закупівлі та оснащення РВО сучасними ремонтними засобами, інструментами та приладами з обов'язковою наявністю спеціалізованих транспортних засобів, станків, власних дизельних генераторів, підйомно-кранового обладнання, що дозволить підняти  $K_{\text{тех}}$ ;

створення та постійне оновлювання електронної бази даних усіх відмов, бойових пошкоджень, з описом всіх супутніх умов за яких це відбулося (з метою накопичення статистичних даних для уточнення розрахункових трудовитрат на усунення тих чи інших пошкоджень), а також зазначенням використаного під час ремонту ЗПП, що значно скоротить час проведення заходів технічної розвідки та визначення необхідних інструментів та матеріалів необхідних для проведення ремонтних робіт;

враховувати освіту та досвід роботи за спорідненими спеціальностями особового складу при призначенні на посади спеціалістів-ремонтників та організувати курси підвищення кваліфікації.

### Висновки

Практична реалізація запропонованих рекомендацій надає можливість підвищити ефективність ремонту ОВТ угруповань ЗРВ змішаного складу під час виконання завдань з протиповітряної оборони в ході ведення бойових дій за рахунок врахування впливу таких чинників, як: кількісний склад та кваліфікація ремонтного персоналу, наявність ефективної інформаційної підтримки при виконанні технологічних операцій ремонту складових частин виробів і зразків ОВТ ППО в цілому; забезпеченість РВО інструментами та матеріалами, необхідними для проведення ремонту. Як наслідок – отримання високої достовірності прогнозу ефективності ремонту озброєння та військової техніки ППО з урахуванням умов ведення бойових дій.

### Список використаних джерел

- [1.] О. В. Глоба, В. С. Мельниченко та А. М. Скиба, "Рекомендації щодо підвищення ефективності відновлення озброєння та військової техніки угруповання зенітних ракетних військ," Повітряна міць України, № 2(7), с. 87–95, 2024, doi: 10.33099/2786-7714-2024-2-7-87-95.
- [2.] В. І. Мірненко, Ред., Технічне забезпечення зенітних ракетних військ (забезпечення озброєнням та військовою технікою, технічне обслуговування та відновлення (ремонт) озброєння та військової техніки, її використання): підручник. Київ, Україна: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2023.
- [3.] В. О. Дачковський, С. А. Копашинський, І. В. Овчаренко та ін., Основи оцінювання ефективності функціонування системи логістики: навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2025.
- [4.] О. Сампір, "Удосконалена методика оцінювання системи відновлення озброєння та військової техніки окремої механізованої бригади," Journal of Scientific Papers "Social Development and Security", т. 11, № 5, 2021. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.16>
- [5.] В. В. Старцев, та ін. "Методики 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, № 2(12), 2022. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14>
- [6.] П. В. Опенько, О. М. Доска та ін., "Напрямки удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних засобів новітніх зенітних ракетних комплексів," Повітряна міць України, № 1(8), с. 76–83, 2025, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-76-83>.
- [7.] Генеральний штаб Збройних Сил України, Інструкція з формування оперативного-стратегічних, оперативного-тактичних та загальних вимог до озброєння та військової техніки ЗС України, наказ № 213 від 24 трав. 2016 р. Київ, Україна: ГШ ЗС України, 2016.
- [8.] Генеральний штаб Збройних Сил України, Тимчасова Доктрина застосування сил оборони держави, наказ № 124\* від 31.03.2020. Київ, Україна: РВВ ЦЗСД МО та ГШ ЗС України, 2020.
- [9.] Генеральний штаб Збройних Сил України, Тимчасова настанова з логістичного забезпечення бойових дій військових частин (підрозділів) Повітряних Сил Збройних Сил України, наказ № 494 від 28.12.2019. Київ, Україна: ГШ ЗС України, 2019.
- [10.] Генеральний штаб Збройних Сил України, Доктрина Об'єднана логістика: ВКП 4-00(01).01, наказ № 2861/НВГШ від 24 верес. 2020 р. Київ, Україна: ГШ ЗС України, 2020.
- [11.] А. В. Крижний та Б. М. Ланецький, Ред., Організація експлуатації та ремонту озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ: підручник. Київ, Україна: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2018.
- [12.] В. О. Шускін, Ред., Теоретичні основи матеріально-технічного забезпечення військ (сил): навчальний посібник. Київ, Україна: ЦНДІ, 2010.
- [13.] Б. Ж. Шкурят та ін., Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння: навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2025.
- [14.] Командування Повітряних Сил ЗС України, Досвід та уроки застосування військових частин та підрозділів Повітряних Сил Збройних Сил України у російсько-українській війні (у період з 01.03.2023 по 30.04.2023): військова публікація. Вінниця, Україна: Командування ПС ЗС України, 2023.
- [15.] Командування Повітряних Сил ЗС України, Досвід та уроки застосування військових частин та підрозділів Повітряних Сил Збройних Сил України у російсько-українській війні (у період з 01.01.2023 по

- 28.02.2023): військова публікація. Вінниця, Україна: Командування ПС ЗС України, 2023.
- [16.] Командування Повітряних Сил ЗС України, Досвід та уроки застосування військових частин та підрозділів Повітряних Сил Збройних Сил України у російсько-українській війні (у період з 01.05.2023 по 31.05.2023): військова публікація. Вінниця, Україна: Командування ПС ЗС України, 2023.
- [17.] Командування Повітряних Сил ЗС України, Досвід та уроки застосування військових частин та підрозділів Повітряних Сил Збройних Сил України у російсько-українській війні (у період з 01.06.2023 по 31.07.2023): військова публікація. Вінниця, Україна: Командування ПС ЗС України, 2023.
- [18.] М. А. Левченко та ін., Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України у російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року): навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2024.
- [19.] Б. Ж. Шкурат та ін., Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України у російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року): навч. посіб. Київ, Україна: НУОУ, 2024.

**Ivan Koviakh**

<https://orcid.org/0009-0008-3541-5616>

**Pavlo Drannyk** (Candidate of military sciences, senior research scientist)

<https://orcid.org/0000-0002-6073-2962>

**Bohdan Bilyavsky** (Candidate of Military Sciences)

<https://orcid.org/0009-0006-9036-7229>

*National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF REPAIR OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT OF AIR DEFENSE DURING COMBAT OPERATIONS

*The repair of weapons and military equipment of air defense forces and assets is one of the key components in ensuring the combat capability of a force grouping under conditions of modern combat operations. The intensity of employment of air attack means, the continuous modernization and increasing complexity of weapon systems, their diversity, as well as the high dynamics of combat operations, require timely and well-grounded decision-making regarding the organization and execution of repair and recovery activities on damaged samples of weapons and military equipment of the Air Defense Missile Forces. Under such conditions, the availability of a scientifically substantiated methodological framework for assessing the effectiveness of repair of weapons and military equipment becomes of primary importance. At the same time, the analysis of existing methodologies for assessing repair effectiveness indicates that they do not fully take into account the comprehensive nature of repair, the actual capabilities of repair and recovery units, the level of training of their personnel, and the specific features of combat conditions.*

*The purpose of the study is to improve the methodology for assessing the effectiveness of repair of air defense weapons and military equipment during the execution of tasks in the course of combat operations. Unlike existing approaches, the proposed methodology is based on a comprehensive consideration of organizational, technical, and personnel factors, in particular the actual level of training of repair unit personnel, the level of their technical and logistical readiness and provision with the necessary technical and operational documentation, as well as the conditions of combat operations. This makes it possible to increase the reliability of assessing repair effectiveness and to substantiate managerial decisions regarding the selection of repair options for weapons and military equipment, taking into account specific combat conditions. The obtained results may be used by relevant command and control bodies when planning the employment of logistics during combat operations of units (subunits) of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, as well as in further research on the organization of repair of weapons and military equipment.*

**Keywords:** *effectiveness assessment, repair of weapons and military equipment, air defense, mean repair time, repair and recovery units.*

### References

- [1.] O. V. Hloba, V. S. Melnychenko, and A. M. Skyba, "Recommendations on improving the efficiency of the restoration of armament and military equipment of the anti-aircraft missile troops grouping," *Air Power of Ukraine*, no. 2(7), pp. 87–95, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-87-95>. (in Ukrainian)
- [2.] V. I. Mirnenko, Ed., *Technical Support of Anti-Aircraft Missile Troops (Provision of Armament and Military Equipment, Maintenance and Restoration (Repair) of Armament and Military Equipment, Its Use): Textbook*. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2023. (in Ukrainian)
- [3.] V. O. Dachkovskiy, S. A. Kopashynskiy, I. V. Ovcharenko, et al., *Fundamentals of Evaluating the Efficiency of the Logistics System Functioning: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2025. (in Ukrainian)

- [4.] O. Sampir, "Improved methodology for assessing the system of restoration of armament and military equipment of a separate mechanized brigade," *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, vol. 11, no. 5, 2021. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.16> (in Ukrainian)
- [5.] V. V. Startsev, "Methods of evaluating the efficiency of restoration of armament and military equipment of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 2(12), 2022. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14>. (in Ukrainian)
- [6.] P. V. Openko, O. M. Doska, et al., "Directions of improving the maintenance and repair system of radio-electronic means of the newest anti-aircraft missile complexes," *Air Power of Ukraine*, no. 1(8), pp. 76–83, 2025. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-1-8-76-83>. (in Ukrainian)
- [7.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, *Instruction on the Formation of Operational-Strategic, Operational-Tactical and General Requirements for Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*, Order No. 213. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, May 24, 2016. (in Ukrainian)
- [8.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, *Temporary Doctrine of the Application of the Defense Forces of the State*, Order No. 124\*. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Mar. 31, 2020. (in Ukrainian)
- [9.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, *Temporary Manual on Logistics Support of Combat Operations of Military Units (Subunits) of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, Order No. 494. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Dec. 28, 2019. (in Ukrainian)
- [10.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, *Doctrine Joint Logistics: VKP 4-00(01).01*, Order No. 2861/NVHSh. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Sep. 24, 2020. (in Ukrainian)
- [11.] A. V. Kryzhnyi and B. M. Lanetskyi, Eds., *Organization of Operation and Repair of Armament and Military Equipment of Anti-Aircraft Missile Troops: Textbook*. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2018. (in Ukrainian)
- [12.] V. O. Shuiekin, Ed., *Theoretical Foundations of Material and Technical Support of Troops (Forces): Study Guide*. Kyiv, Ukraine: Central Scientific Research Institute, 2010. (in Ukrainian)
- [13.] B. Zh. Shkurat et al., *Air and Missile Defense Means of the Defense Forces of Ukraine. Foreign Armament: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2025. (in Ukrainian)
- [14.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, *Experience and Lessons from the Employment of Military Units and Subunits of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine in the russian-Ukrainian War (for the period from Mar. 1, 2023, to Apr. 30, 2023): Military Publication*. Vinnytsia, Ukraine: Air Force Command, 2023. (in Ukrainian)
- [15.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, *Experience and Lessons from the Employment of Military Units and Subunits of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine in the russian-Ukrainian War (for the period from Jan. 1, 2023, to Feb. 28, 2023): Military Publication*. Vinnytsia, Ukraine: Air Force Command, 2023. (in Ukrainian)
- [16.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, *Experience and Lessons from the Employment of Military Units and Subunits of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine in the russian-Ukrainian War (for the period from May 1, 2023, to May 31, 2023): Military Publication*. Vinnytsia, Ukraine: Air Force Command, 2023. (in Ukrainian)
- [17.] Air Force Command of the Armed Forces of Ukraine, *Experience and Lessons from the Employment of Military Units and Subunits of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine in the russian-Ukrainian War (for the period from Jun. 1, 2023, to Jul. 31, 2023): Military Publication*. Vinnytsia, Ukraine: Air Force Command, 2023. (in Ukrainian)
- [18.] M. A. Levchenko et al., *Employment of Air Defense Forces and Means of Ukraine in the russian-Ukrainian War: Experience, Lessons, Recommendations (February 2022 – July 2023): Study Guide*. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)
- [19.] B. Zh. Shkurat et al., *Employment of Air Defense Forces and Means of Ukraine in the russian-Ukrainian War: Experience, Lessons, Recommendations (August – December 2023): Study Guide*. Kyiv, Ukraine: National Defence University of Ukraine, 2024. (in Ukrainian)

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-131-139**

**УДК 355.41 (477)**

**Смиченко Євген Олександрович**  
<https://orcid.org/0000-0001-9446-2422>

**Національний університет оборони України, Київ, Україна**

*Рукопис надійшов до редакції: 04.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 18.03.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ РЕМОНТНОГО ФОНДУ ЗАСОБІВ НАЗЕМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ АВІАЦІЇ СИЛ ОБОРОНИ ДО РЕМОНТНИХ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН**

*Забезпечення технічної готовності засобів наземного забезпечення польотів в умовах високоінтенсивних бойових дій вимагає впровадження нових підходів до управління обмеженими ресурсами, а також їх розподілу.*

*У статті представлено методику оптимального розподілу ремонтного фонду засобів наземного забезпечення польотів авіації сил оборони до ремонтних військових частин, в основі якої лежить розв'язання транспортної задачі за допомогою методу потенціалів. Методика дозволяє мінімізувати логістичні та часові витрати при переміщенні несправних засобів наземного забезпечення польотів до ремонтних військових частин. Методика ґрунтується на математичній моделі функціонування системи відновлення засобів наземного забезпечення польотів авіації сил оборони в операціях, яка на відміну від існуючих інтегрує показники фактичного технічного стану засобів наземного забезпечення польотів, ступінь пріоритетності їх відновлення та часові параметри логістичних маршрутів переміщення ремонтного фонду. Застосування методики забезпечує скорочення циклу прийняття управлінських рішень під час планування логістичного забезпечення в ході виконання бойових завдань військовими частинами авіації сил оборони.*

*Практична апробація отриманих результатів підтверджує ефективність оптимізації розподілу ремонтного фонду, що виражається у скороченні термінів простою техніки та мінімізації витрат на її переміщення. Результати дослідження можуть бути імplementовані в роботу органів військового управління, а також стати підґрунтям для створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері логістичного забезпечення авіації сил оборони.*

**Ключові слова:** математичне моделювання; відновлення; модель; ефективність; засоби наземного забезпечення польотів; технічне забезпечення; озброєння та військова техніка; часові параметри; система відновлення; оцінювання ефективності; функціонування системи; технічна готовність.

### **Вступ**

Ефективність застосування авіації сил оборони в сучасних умовах збройної агресії безпосередньо залежить від технічного стану та оперативності відновлення засобів наземного забезпечення польотів (ЗНЗП). В умовах високоінтенсивного вогневого впливу та динамічної зміни оперативної обстановки інфраструктура забезпечення зазнає значних навантажень, що призводить до накопичення несправного парку техніки (ремонтного фонду). Обмеженість виробничих потужностей ремонтних частин та необхідність мінімізації часу на евакуацію та відновлення ЗНЗП ставлять перед органами військового управління складну задачу раціонального розподілу ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання логістичного забезпечення та відновлення озброєння та військової техніки (ОВТ) розглядалися у працях багатьох вітчизняних та закордонних вчених. У статті [1] розглядається проблема оцінювання надійності складних технічних систем. Автори обґрунтовують

використання закону Вейбулла як універсального інструменту для опису розподілу часу до відмови в умовах обмеженої статистичної бази.

У працях [2, 3] детально висвітлені питання автоматизації процесів управління та математичного моделювання потоків у складних логістичних системах технічного забезпечення.

У публікаціях [4, 5] представлено математичну модель системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки Повітряних Сил, побудовану на апараті теорії масового обслуговування та розробку математичних моделей процесу зміни технічного стану зразків будівельної техніки в рамках реалізації стратегії технічної експлуатації. Автори формалізували процеси відновлення як багаторівневу ієрархічну структуру, що функціонує в умовах високої невизначеності. Важливим висновком досліджень є визначення вихідних параметрів моделі (кількість ремонтного фонду та розподіл за видами робіт), які стають базою для подальшої оптимізації логістичних маршрутів. Проаналізований у праці [6] досвід функціонування

системи перевезення військ та матеріальних засобів у період 2020–2022 років, вказує на наявність проблемних питань в організації планування евакуації несправного озброєння та військової техніки. Це підкреслює актуальність математичного моделювання з метою підвищення ефективності управління транспортними потоками. У роботі [7] автори використовують апарат теорії масового обслуговування для моделювання процесу відновлення техніки, що дозволяє знайти баланс між мінімізацією витрат на утримання ремонтного підрозділу та максимізацією швидкості повернення озброєння до бойового складу. У статті [8] представлено комплексний науково-методичний підхід до оцінювання ефективності процесів відновлення озброєння та військової техніки специфічної номенклатури Повітряних Сил ЗС України з урахуванням сучасного досвіду бойових дій.

У статті [9] обґрунтовано застосування математичного апарату лінійного програмування для оптимізації процесів перевезення матеріально-технічних засобів у тактичній ланці з метою підвищення оперативної ефективності логістичного забезпечення в умовах високодинамічного бойового середовища. Автори пропонують математичну модель, яка дозволяє мінімізувати логістичні витрати та час доставки вантажів шляхом раціонального розподілу транспортних ресурсів, що безпосередньо корелюється з потребою автоматизації прийняття рішень у сучасних системах військового управління. У сучасних дослідженнях закордонних авторів, зокрема у [10], проаналізовано вплив концепції розосередженого базування та технічного обслуговування (Agile Combat Employment) на боєздатність авіаційних підрозділів. Автори пропонують методику оцінювання зниження темпів вильотів при розподілі ремонтних ресурсів між декількома оперативними локаціями та обґрунтовують необхідність гнучкого маневрування логістичними активами.

У дослідженні [11] представлено методику визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування зразків аеродромної будівельної техніки, що експлуатуються понад встановлений ресурс. Автори обґрунтували використання дифузійного монотонного закону розподілу як найбільш адекватного для опису процесів зносу механічних вузлів техніки в умовах інтенсивного використання.

Авторами статті [12] було розроблено методику оцінювання ефективності функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки військового призначення. У зазначеній праці застосовано математичне моделювання на основі напівмарковських випадкових процесів та дифузійного немонотонного закону розподілу відмов, що дозволяє кількісно визначити показник надійності – коефіцієнт технічного використання.

В роботі [13] проведено дослідження особливостей експлуатації та відновлення

технічної готовності специфічної номенклатури засобів наземного забезпечення польотів авіації Повітряних Сил ЗСУ.

У науковій праці [14] розроблено математичну модель функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки військових частин повітряного командування. Дослідження ґрунтується на застосуванні апарату теорії масового обслуговування, що дозволяє врахувати стохастичний характер процесів відновлення в умовах високої невизначеності та впливу дестабілізуючих факторів.

Аналіз методики проектування ремонтно-відновлюваних органів, представленої в роботі [15], засвідчив необхідність врахування логістичної складової – відстаней між джерелами ремонтного фонду та базами відновлення, а також динамічного завантаження останніх. У роботі [16] запропоновано удосконалену методику оцінки ефективності функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки військового призначення. Зазначена методика не повною мірою враховує специфіку просторового розподілу ремонтного фонду ЗНЗП в умовах розосередження авіаційних підрозділів, що підтверджує актуальність розробки методики, яка базується на розв'язанні транспортної задачі методом потенціалів для мінімізації логістичного плеча.

Отже, незважаючи на вагомий внесок вітчизняних та закордонних вчених у питання логістичного забезпечення та відновлення ОБТ, існуючі методики орієнтовані переважно на загальну номенклатуру ОБТ або логістику сухопутного компонента. Специфіка ЗНЗП, як критично важливого складника аеродромно-технічного забезпечення авіації, потребує особливих підходів до мінімізації логістичних витрат.

На сьогодні існує суперечність між необхідністю негайного відновлення технічної готовності ЗНЗП та відсутністю адаптованих математичних інструментів оперативного розподілу ремонтного фонду. Необхідність одночасного врахування просторового розміщення аеродромів, виробничих спроможностей ремонтних частин та ризиків вогневого впливу на транспортні шляхи обумовлює потребу в розробці методики на основі методу потенціалів, що і визначило мету даної статті – розроблення методики оптимального розподілу ремонтного фонду засобів наземного забезпечення польотів авіації сил оборони до ремонтних військових частин (далі – методика).

### **Матеріали та методи**

Для реалізації поставленої у статті мети було застосовано задачу лінійного програмування [17], зокрема розв'язання транспортної задачі за критерієм мінімізації часу методом потенціалів. Метод формалізації дозволив представити систему відновлення ЗНЗП у вигляді транспортної моделі лінійного програмування, де за допомогою використання методу потенціалів здійснювався пошук оптимального плану розподілу ремонтного

фонду за критерієм мінімізації часових витрат. Метод порівняння використано для зіставлення спроможностей різних ремонтних підрозділів та наочного відображення отриманих результатів оптимізації транспортних потоків.

### Результати

Методи оптимізації із застосуванням задач лінійного програмування дозволяють враховувати технічний стан, пріоритетність, фінансові

обмеження та логістичні фактори в єдиній моделі, що забезпечує обґрунтоване, ефективне та гнучке управління ремонтним фондом.

Однією із задач лінійного програмування є транспортна задача, яка розглядається як задача оптимального розподілу ремонтного фонду ЗНЗП (далі – Задача). Задача є основою для представленої методики, блок-схема розроблення якої наведена на рис. 1.

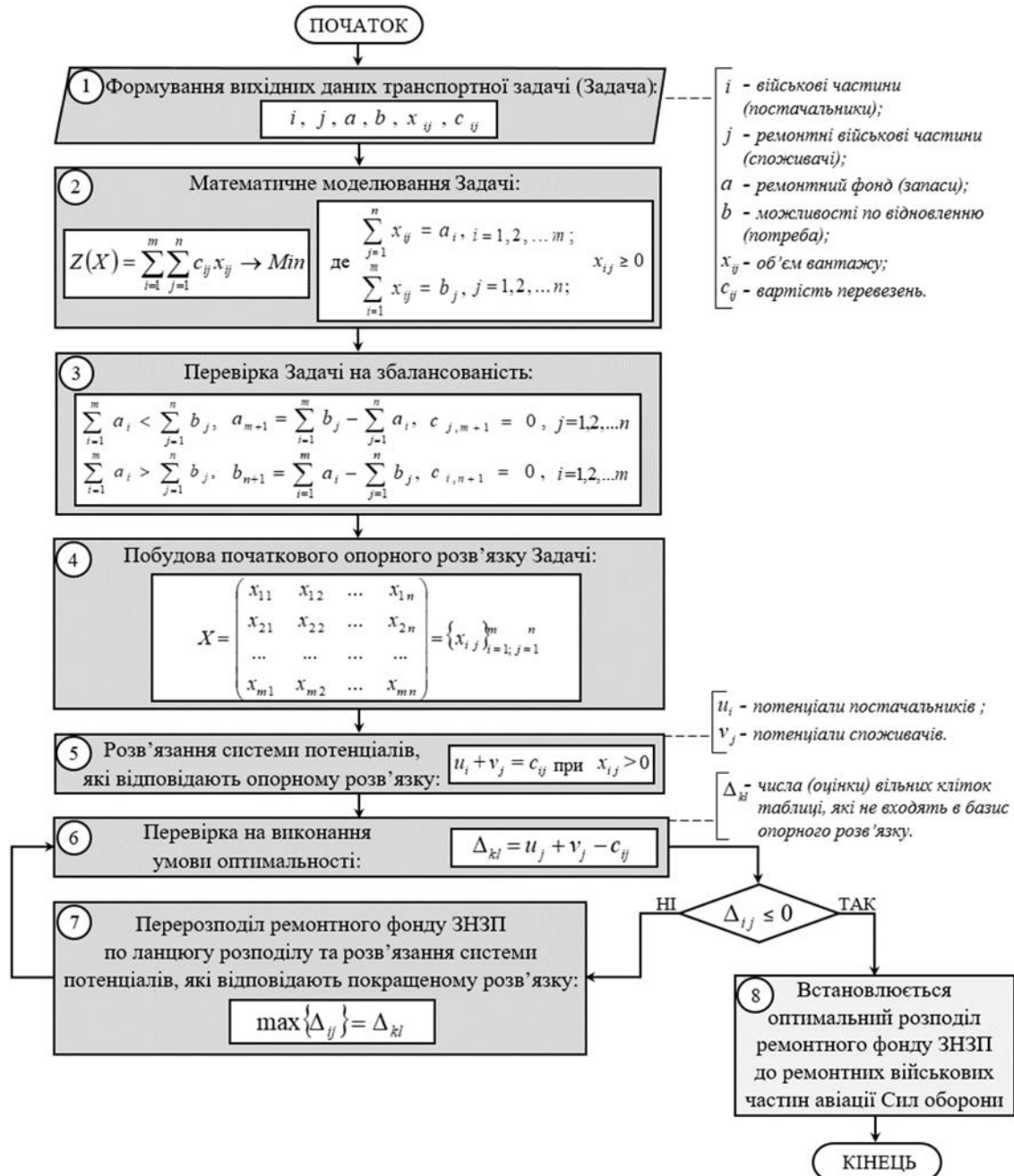


Рисунок 1 – Блок-схема методики оптимального розподілу ремонтного фонду ЗНЗП авіації сил оборони до ремонтних військових частин

#### Етапи методики.

1. Формування вихідних даних транспортної задачі.

На цьому етапі формуються вихідні дані, що складаються з наступних елементів:

$i$  – військові частини угруповання авіації Повітряних Сил (далі – постачальники) з наявним

ремонтним фондом несправних ЗНЗП  $a_1, a_2, \dots, a_m$  (далі – запаси);

$j$  – ремонтні військові частини (далі – споживачі) з можливостями щодо відновлення несправних ЗНЗП  $b_1, b_2, \dots, b_n$  (далі – потреба);

$x_{ij}$  – об'єм вантажу (кількість техніки), що перевозиться від постачальників  $i$  до споживачів  $j$ ;

$c_{ij}$  – вартість перевезення одиниці несправних ЗНЗП від постачальників  $i$  до споживачів  $j$ ;

$u_i$  – потенціали постачальників;

$v_j$  – потенціали споживачів;

$\Delta_{kl}$  – числа (оцінки) вільних кліток таблиці, які не входять в базис опорного розв’язку.

Потрібно скласти такий розподіл ремонтного фонду, щоб потреби всіх споживачів були задоволені і сумарні витрати на перевезення були мінімальні.

2. Математичне моделювання Задачі.

На цьому етапі формується умова Задачі у табличному вигляді:

	$b_1$	$b_2$	...	$b_n$
$a_1$	$c_{11}$	$c_{12}$	...	$c_{1n}$
$a_2$	$c_{21}$	$c_{22}$	...	$c_{2n}$
...	...	...	...	...
$a_m$	$c_{m1}$	$c_{m2}$	...	$c_{mn}$

Умова Задачі сформована, якщо задано:

вектор запасів  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} = \{a_i\}_{i=1}^m$ ;

вектор потреб  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} = \{b_j\}_{j=1}^n$ ;

матрицю вартості перевезень  $C = \{c_{ij}\}_{i=1, j=1}^{m, n}$ .

Якщо  $x_{ij}$  – об’єм вантажу (кількість ремонтного фонду ЗНЗП), що перевозиться від постачальника  $i$  до споживача  $j$ , то вартість такого перевезення дорівнює  $c_{ij}x_{ij}$ . Загальна вартість перевезення всіх вантажів становитиме

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij}$$

Слід зауважити що вартість перевезень може бути визначена як у грошових одиницях, враховуючи вартість усіх логістичних процесів на перевезення, так і в часових показниках. Якщо необхідно зменшити до мінімуму загальну вартість перевезень ( $Z$ ), цільова функція Задачі буде мати такий вигляд:

$$Z(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} \rightarrow \min.$$

Система обмежень містить дві групи рівнянь.

Перша група із  $m$  рівнянь вказує на те, що запаси всіх  $m$  постачальників вивозяться повністю, тобто

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = 1, 2, \dots, m.$$

Друга група обмежень із  $n$  рівнянь вказує на те, що потреби всіх  $n$  споживачів повністю задовольняються, тобто

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = 1, 2, \dots, n.$$

Враховуючи, що  $x_{ij} \geq 0$ , математична модель Задачі матиме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} Z(X) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} \rightarrow \min; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &= a_i, i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= b_j, j = 1, 2, \dots, n; \\ x_{ij} &\geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В розглянутій моделі Задачі вважається, що загальні запаси постачальників дорівнюють загальним потребам споживачів, тобто виконується умова

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j.$$

Зазначена Задача називається задачею з правильним балансом, а її модель – закритою. Якщо ж рівність не виконується, то Задача називається задачею з неправильним балансом, а її модель – відкритою.

При розв’язуванні Задачі потрібно знайти план перевезень (у матричному вигляді), який задовольняє систему обмежень і відповідає мінімуму цільової функції:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} = \{x_{ij}\}_{i=1, j=1}^{m, n}, \quad (2)$$

План перевезень, який задовольняє систему обмежень, називається допустимим. План перевезень, при якому цільова функція мінімальна, називається оптимальним.

Математична модель Задачі у векторному вигляді:

$$A = \begin{matrix} x_{11}x_{12}\dots x_{1n}x_{21}x_{22}\dots x_{2n}\dots x_{m1}x_{m2}\dots x_{mn} \\ \left( \begin{array}{cccccccccccc} 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right) \end{matrix} \quad (3)$$

Матриця  $A$  складається із стовпчиків  $A_{ij}$  і кожен стовпчик побудований по наступному правилу:

стовпчик  $A_{ij}$  містить  $m+n$  компонент і тільки дві з них відмінні від нуля і дорівнюють одиниці. Перша одиниця вектора  $A_{ij}$  стоїть на місці  $i$ , друга одиниця стоїть на місці  $m+j$ .

$$A_{ij} = \left\{ \begin{matrix} i & m+j \\ \downarrow & \downarrow \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{matrix} \right\}^T$$

Вводиться до розгляду вектор:

$$A_0 = \{\bar{a}, \bar{b}\}^T = \{a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_n\}^T$$

Кожному вектору  $A_{ij}$  ставиться у відповідність змінна  $x_{ij}$ . Тоді математична модель Задачі матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} Z(X) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} x_{ij} &= A_0, \\ x_{ij} &\geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (4)$$

### 3. Перевірка Задачі на збалансованість.

Якщо Задача має неправильний баланс і

$$\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j,$$

то потрібно ввести “фіктивного” постачальника ремонтного фонду ЗНЗП із запасом

$$a_{m+1} = \sum_{i=1}^m b_j - \sum_{j=1}^n a_i$$

і з вартістю перевезень  $c_{j,m+1} = 0, j = 1, 2, \dots, n$ .  
Якщо Задача має неправильний баланс і

$$\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j,$$

то потрібно ввести “фіктивну” ремонтну військову частину з можливостями щодо ремонту ЗНЗП

$$b_{n+1} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j,$$

і з вартістю перевезень  $c_{i,n+1} = 0, i = 1, 2, \dots, m$ .

### 4. Побудова початкового опорного розв’язку Задачі.

На цьому етапі потрібно перевірити, що в таблиці транспортної задачі зайнято  $m+n-1$  кліток і система векторів-умов, які відповідають одержаному розв’язку, лінійно незалежна.

Необхідно задовольнити потреби споживача за рахунок найбільш вигідного постачальника і заповнити ту клітку, якій на даному кроці відповідає мінімальне значення  $c_{ij}$ . На кожному кроці виключається з розгляду один постачальник, або один споживач. Якщо запаси постачальника вичерпані, а відповідний рядок містить чергове мінімальне значення  $c_{ij}$ , то у відповідну клітку таблиці заносять базисний нуль, і тільки після цього, рядок викреслюється. Аналогічно поступають з споживачем.

Розв’язок Задачі є опорним, тобто відповідна йому система векторів-умов лінійно незалежна.

Перехід від одного опорного розв’язку до іншого можна виконати, використовуючи цикл.

Для деякої вільної клітки таблиці будується цикл, який містить в собі частину кліток опорного розв’язку. По цьому циклу перерозподіляється перевезення. Перевезення із зайнятої клітки переноситься у вільну клітку і так одержується новий опорний розв’язок.

Якщо таблиця Задачі містить опорний розв’язок, то для будь-якої вільної клітки таблиці існує єдиний цикл, який містить в собі цю клітку і частину кліток, зайнятих опорним розв’язком.

Якщо допустимий розв’язок  $X = \{x_{ij}\}_{i=1, j=1}^{m, n}$ . Задачі є оптимальний, то існують потенціали (числа) постачальників  $u_i, i = 1, 2, \dots, m$ , і потенціали (числа) споживачів  $v_j, j = 1, 2, \dots, n$ , які задовольняють умови:

$$\begin{aligned} u_i + v_j &= c_{ij}, \quad \text{при } x_{ij} > 0, \\ u_i + v_j &\leq c_{ij}, \quad \text{при } x_{ij} = 0. \end{aligned}$$

У вихідній задачі вектор-умова  $A_{ij}$  має дві відмінні від нуля одиничні компоненти з номерами  $i$  і  $m+j$ , тому кожна умова двоїстої задачі містить лише дві змінні у вигляді  $u_i + v_j$ . Умов невід’ємності в двоїстій задачі немає через те, що всі умови вихідної задачі – рівняння. Згідно з другою теоремою двоїстості, якщо при підстановці в систему обмежень двоїстої задачі її розв’язку деяке обмеження виконується як строга нерівність виду  $u_i + v_j < c_{ij}$ , то відповідна координата оптимального розв’язку  $x_{ij}$  вихідної задачі відмінна від нуля, тобто  $x_{ij} > 0$ .

Група рівнянь  $u_i + v_j = c_{ij}$  при  $x_{ij} = 0$  використовується як система рівнянь для знаходження потенціалів. Система має  $m+n$  невідомих  $u_i, i = 1, 2, \dots, m$  і  $v_j, j = 1, 2, \dots, n$ . Кількість рівнянь в системі дорівнює  $m+n-1$ , тобто дорівнює кількості відмінних від нуля координат не виродженого опорного розв’язку. Через те, що кількість невідомих на одиницю більша від кількості рівнянь, одному з невідомих надається довільне значення, а решта визначається з системи.

### 5. Розв’язання системи потенціалів, які відповідають опорному розв’язку.

На цьому етапі потрібно побудувати і розв’язати систему рівнянь  $u_i + v_j = c_{ij}$ , при  $x_{ij} > 0$ . Для того щоб знайти частинний розв’язок системи, одному із потенціалів (найвигідніше тому потенціалу  $u_i$ , або  $v_j$ , якому відповідає більша кількість зайнятих клітин) надають деяке значення (нуль) і обчислюють решту потенціалів по формулах  $u_i = c_{ij} - v_j$ , якщо відомо  $v_j$ , або  $v_j = c_{ij} - u_i$ , якщо відомо  $u_i$ .

### 6. Перевірка на виконання умови оптимальності.

Для перевірки оптимальності опорного розв’язку використовується група нерівностей  $u_i + v_j = c_{ij}, x_{ij} > 0$ . Ці нерівності зручніше записувати у вигляді:

$$\Delta_{kl} = u_i + v_j - c_{ij} \quad \text{при } x_{ij} = 0,$$

де  $\Delta_{kl}$  – числа (оцінки) вільних кліток таблиці, які не входять в базис опорного розв'язку.

Потрібно обчислити результат для всіх вільних кліток по формулі  $\Delta_{kl} = u_i + v_j - c_{ij}$  і ті результати, які більші нуля, записати у лівій нижній кут клітки.

Якщо для всіх вільних кліток результати  $\Delta_{kl} \leq 0$ , то це означає, що отримано оптимальний розв'язок. Після цього потрібно обчислити значення цільової функції. Це свідчить про отримання оптимального плану розподілу ремонтного фонду ЗНЗП до ремонтних військових частин.

Якщо ж є хоч одна клітка з додатнім результатом, необхідно переходити до наступного етапу методики.

7. *Перерозподіл ремонтного фонду ЗНЗП по ланцюгу розподілу та розв'язання системи потенціалів, які відповідають покращеному розв'язку.*

Для покращення опорного розв'язку використовуються оцінки для вільних кліток транспортної таблиці. При цьому знаходять клітку  $(k,l)$ , якій відповідає  $\max\{\Delta_{ij}\} = \Delta_{kl}$ . Якщо  $\Delta_{kl} \leq 0$ , то розв'язок оптимальний. Якщо ж  $\Delta_{kl} > 0$ , то для відповідної клітки  $(k,l)$ , будують цикл і намагаються покращити розв'язок, перерозподіляючи вантаж  $\theta = \min\{x_{ij}\}$  по циклу. При цьому фіксується клітка таблиці з найбільшим додатнім результатом  $\max\{\Delta_{ij}\} = \Delta_{kl}$  та будується цикл розподілу, який містить в собі зафіксовану клітку і частину кліток, зайнятих покращеним розв'язком. Клітка з найбільшою додатною оцінкою позначається знаком "+", наступна позначається знаком "-" і т. д. Виконується перерозподіл вантажу по побудованому циклу на величину  $\theta = \min\{x_{ij}\}$ . Клітка зі знаком "-", якій відповідає  $\min\{x_{ij}\}$ , стає порожньою. Якщо мінімум досягається в кількох клітках, то одна з них залишається порожньою, а в решту ставляться базисні нулі, щоб кількість зайнятих кліток дорівнювала  $m+n-1$ .

Після цього необхідно повернутися до шостого етапу методики та перевірити виконання умов оптимальності. Якщо умови  $\Delta_{ij} \leq 0$  виконуються – встановити оптимальний розподіл ремонтного фонду ЗНЗП авіації сил оборони до ремонтних військових частин.

### Обговорення

В ході швидкозмінної оперативної обстановки, в умовах обмежених часових показників, для забезпечення виконання завдань військовими частинами угруповання авіації визначають терміни, у яких ЗНЗП мають бути відновлені для виконання завдань. Тому дуже важливо в найкоротші терміни прийняти правильне, а головне оптимальне за часом рішення, щодо розподілу несправних ЗНЗП до ремонтних військових частин. Це в свою чергу впливає на загальний час, який відведений на виявлення несправних зразків ЗНЗП, їх евакуацію, транспортування до ремонтних військових частин, ремонту та повернення до військових частин.

Існуючі підходи демонструють поступовий перехід від жорстко регламентованих схем до гнучких, адаптивних моделей. Найбільш ефективними в сучасних умовах є системні та математично обґрунтовані методики, що дозволяють оптимізувати використання обмежених ресурсів. Впровадження методів лінійного програмування є логічним кроком до підвищення ефективності функціонування системи відновлення. Для оптимального розподілу ремонтного фонду ЗНЗП авіації сил оборони до ремонтних військових частин застосовується умова транспортної задачі розподілу ремонтного фонду ЗНЗП, яка адаптується під наявні потреби. Транспортна задача є задачею лінійного програмування і її можна розв'язувати алгоритмом симплекс-методу. Через те, що ця задача має ряд особливостей (обмеження задано у вигляді рівнянь; кожне невідоме входить лише в два рівняння; коефіцієнти при невідомих – одиниці), для її розв'язування були створені спеціальні алгоритми.

В роботі запропоновано методику оптимального розподілу ремонтного фонду ЗНЗП авіації сил оборони до ремонтних військових частин. Результати практичної апробації розробленої методики [18] підтвердили ефективність запропонованих підходів щодо оптимізації розподілу ремонтного фонду ЗНЗП, що виражається у скороченні термінів простою техніки та мінімізації витрат на її переміщення (рис. 2).

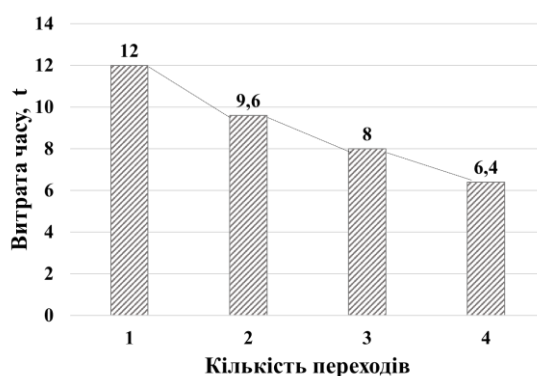


Рисунок 2 – Результати оптимального розподілу ремонтного фонду ЗНЗП до ремонтних військових частин авіації сил оборони

Результати дослідження можуть бути імплементовані в роботу органів військового управління, а також стати підґрунтям для створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері логістичного забезпечення авіації сил оборони.

### Висновки

Таким чином, у статті запропонована методика оптимального розподілу ремонтного фонду ЗНЗП авіації сил оборони до ремонтних військових частин, яку доцільно застосувати для забезпечення раціонального завантаження ремонтних каналів та скорочення термінів повернення техніки до строю. Використання методики дасть змогу приймати обґрунтовані управлінські рішення під час

планування логістичного забезпечення та сприятиме скороченню витрат як по часу так і по вартості.

### Список використаних джерел

- [1.] V. Dyptan, P. Yablonsky, O. Avramenko, V. Klymchuk, P. Openko, and V. Polishchuk, "Reliability assessment of highly reliable samples using the tolerance limits and the Weibull's law," in *Advances in Computer Science for Engineering and Education*. Springer, 2022, pp. 53–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5_23).
- [2.] В. О. Дачковський та Л. М. Родченко, "Методика оцінювання відновлюваності озброєння та військової техніки," *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 3(36), с. 89–96, 2019. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-89-96>.
- [3.] О. М. Сампір, "Удосконалена методика оцінювання системи відновлення озброєння та військової техніки окремої механізованої бригади," *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, т. 11, № 5, с. 165–178, 2021. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.16>.
- [4.] В. В. Поліщук, А. Г. Салій, Ю. П. Целішев, В. І. Іванов та Ю. М. Косков, "Обґрунтування математичної моделі функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки Повітряних Сил в умовах швидкої зміни обстановки," *Повітряна міць України*, с. 61–64, 2022. [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).
- [5.] P. Openko, M. Pidhorodetskyi, A. Saliı, and O. Saliı, "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 of Materials and Theory of Structures*, no. 110, pp. 375–392, 2023. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.375-392>.
- [6.] Є. О. Смиченко, В. В. Поліщук, М. Ю. Миронюк та ін., "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. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-58-62>.
- [7.] О. М. Рахманний, "Підходи до моделювання системи відновлення озброєння та військової техніки під час ведення бойових дій," *Грааль науки*, № 32, с. 113–116, 2023. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.13.10.2023.020>.
- [8.] В. В. Старцев, О. П. Мусієнко, О. М. Гурін, В. В. Просяник та О. В. Коломійцев, "Методики 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*, № 2(12), с. 134–144, 2022. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14>.
- [9.] Є. В. Шинкар, О. О. Лаврут та Т. В. Лаврут, "Метод лінійного програмування вирішення задачі перевезення матеріально-технічних засобів у підрозділах тактичної ланки для підвищення ефективності логістичного забезпечення," *Військово-технічний збірник "Експлуатація та відновлення озброєння та військової техніки"*, № 32, с. 87–95, 2025. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.87-95>.
- [10.] K. F. Lynch, R. Castle, J. G. Drew, et al., *Assessing Agile Combat Employment for the Pacific Air Forces: Estimating the Impacts of Distributed Maintenance Postures on Sortie Rate Potential*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2024. <https://doi.org/10.7249/RR4999-3>.
- [11.] O. V. Avramenko et al., "Determination of the optimal technical servicing periodicity of samples of aerodrome construction equipment," *Strength of Materials and Theory of Structures*, no. 107, pp. 265–280, 2021. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.265-280>.
- [12.] А. Г. Салій, В. В. Поліщук, В. П. Диптан та В. І. Іванов, "Методика оцінювання ефективності функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки військового призначення," *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 3(30), с. 162–165, 2017. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2017-30-3-162-165>.
- [13.] А. А. Звонко, І. В. Овчаренко, О. В. Ярошенко та ін., "Методичний підхід до визначення можливостей системи відновлення озброєння та військової техніки з технічної розвідки," *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, т. 11, № 5, с. 146–154, 2021. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.14>.
- [14.] В. В. Поліщук, "Математична модель функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки військового призначення," *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 3(24), с. 93–97, 2015. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-24-3-93-96>.
- [15.] В. О. Дачковський, О. В. Ярошенко, І. В. Овчаренко та О. М. Сампір, "Методика проектування ремонтно-відновлюваних органів," *Збірник наукових праць Військової академії*, № 1(13), ч. I, с. 210–222, 2020. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.13.1.210-222>.
- [16.] В. В. Поліщук, "Удосконалена методика оцінки ефективності функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки військового призначення," *Збірник наукових праць ЦВСД НУОУ*, № 3(55), с. 109–112, 2015.
- [17.] О. К. Молодід, *Транспортна задача: навч. посіб.* Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
- [18.] Центральне управління забезпечення авіації та протиповітряної оборони Озброєння КСЛІ ЗС України, "Акт про реалізацію результатів дисертаційного дослідження," Вих. № 2121, 30 січ. 2026.

Yevhen Smychenko

<https://orcid.org/0000-0001-9446-2422>

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## METHODOLOGY FOR OPTIMAL DISTRIBUTION OF THE REPAIR FUND OF GROUND EQUIPMENT OF AIRCRAFT SUPPORT OF THE DEFENCE FORCES TO MILITARY REPAIR UNITS

*Ensuring the technical readiness of ground flight support facilities in conditions of high-intensity combat operations requires the introduction of new approaches to managing limited resources and their distribution.*

*The article presents a methodology for the optimal distribution of the repair fund for ground-based aviation support equipment of the Defense Forces to military repair units, which is based on solving a transport problem using the potential method. The methodology allows minimizing logistics and time costs when moving faulty ground-based aviation support equipment to military repair units. The methodology is based on a developed mathematical model that integrates indicators of the actual technical condition of ground flight support equipment, the priority of their restoration, and the time parameters of logistics routes for moving the repair fund. The application of the methodology ensures a reasonable reduction in the cycle of management decision-making when planning logistical support during the performance of combat missions by the aviation units of the Defense Forces.*

*Practical testing of the results confirms the effectiveness of optimizing the distribution of repair funds, which is reflected in reduced equipment downtime and minimized transportation costs. The results of the study can be implemented in the work of military management bodies and serve as a basis for the creation of automated decision support systems in the field of logistics support for the Air Force.*

**Keywords:** *mathematical modeling; recovery; model; efficiency; ground flight support facilities; technical support; weapons and military equipment; time parameters; recovery system; efficiency assessment; system functioning; technical readiness.*

### References

- [1.] V. Dyptan, P. Yablonsky, O. Avramenko, V. Klymchuk, P. Openko, and V. Polishchuk, "Reliability assessment of highly reliable samples using the tolerance limits and the Weibull's law," in *Advances in Computer Science for Engineering and Education*. Springer, 2022, pp. 53–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5_23).
- [2.] V. O. Dachkovskiy and L. M. Rodchenko, "Methodology for assessing the recoverability of armament and military equipment," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 3(36), pp. 89–96, 2019. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-89-96>. (in Ukrainian)
- [3.] O. M. Sampir, "Improved methodology for assessing the system of restoration of armament and military equipment of a separate mechanized brigade," *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, vol. 11, no. 5, pp. 165–178, 2021. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.16> (in Ukrainian)
- [4.] V. V. Polishchuk, A. H. Salii, Yu. P. Tselishev, V. I. Ivanov, and Yu. M. Koskov, "Justification of the mathematical model of the functioning of the automotive and special equipment restoration system of the Air Force in conditions of rapid situation changes," *Air Power of Ukraine*, pp. 61–64, 2022. [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). (in Ukrainian)
- [5.] P. Openko, M. Pidhorodetskyi, A. Salii, and 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 of Materials and Theory of Structures*, no. 110, pp. 375–392, 2023. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.375-392>.
- [6.] Ye. O. Smychenko, V. V. Polishchuk, M. Yu. Myroniuk, et al., "Analysis of the work of military command bodies on the provision of troops with material and technical means during 2020–2022 in the Joint Forces Operation zone," *Air Power of Ukraine*, no. 1(4), pp. 58–62, 2023. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-58-62>. (in Ukrainian)
- [7.] O. M. Rakhmanyyi, "Approaches to modeling the system of restoration of armament and military equipment during combat operations," *Grail of Science*, no. 32, pp. 113–116, 2023. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.13.10.2023.020> (in Ukrainian)
- [8.] V. V. Startsev, O. P. Musiienko, O. M. Hurin, V. V. Prosiannyk, and O. V. Kolomiitsev, "Methods of evaluating the efficiency of restoration of armament and military equipment of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 2(12), pp. 134–144, 2022. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14> (in Ukrainian)
- [9.] Ye. V. Shynkar, O. O. Lavrut, and T. V. Lavrut, "Linear programming method for solving the problem of transportation of materiel in tactical units to improve the efficiency of logistics support," *Military Technical Collection "Operation and Restoration of Armament and Military Equipment"*, no. 32, pp. 87–95, 2025. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.87-95> (in Ukrainian)
- [10.] K. F. Lynch, R. Castle, J. G. Drew, et al., *Assessing Agile Combat Employment for the Pacific Air Forces: Estimating the Impacts of Distributed Maintenance Postures on Sortie Rate Potential*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2024. <https://doi.org/10.7249/RR4999-3>
- [11.] O. V. Avramenko et al., "Determination of the optimal

- technical servicing periodicity of samples of aerodrome construction equipment," *Strength of Materials and Theory of Structures*, no. 107, pp. 265–280, 2021. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.265-280>
- [12.] A. H. Sali, V. V. Polishchuk, V. P. Dyptan, and V. I. Ivanov, "Methodology for assessing the effectiveness of the functioning of the restoration system of automotive and special military equipment," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 3(30), pp. 162–165, 2017. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2017-30-3-162-165> (in Ukrainian)
- [13.] A. A. Zvonko, I. V. Ovcharenko, O. V. Yaroshenko, et al., "Methodological approach to determining the capabilities of the armament and military equipment restoration system for technical reconnaissance," *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, vol. 11, no. 5, pp. 146–154, 2021. (in Ukrainian)
- [14.] V. V. Polishchuk, "Mathematical model of the functioning of the restoration system of automotive and special military equipment," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 3(24), pp. 93–97, 2015. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-24-3-93-96> (in Ukrainian)
- [15.] V. O. Dachkovskiy, O. V. Yaroshenko, I. V. Ovcharenko, and O. M. Sampir, "Methodology for designing repair and restoration bodies," *Collection of Scientific Works of the Military Academy*, no. 1(13), pt. 1, pp. 210–222, 2020. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.14> (in Ukrainian)
- [16.] V. V. Polishchuk, "Improved methodology for evaluating the effectiveness of the functioning of the restoration system of automotive and special military equipment," *Collection of Scientific Works of the Center for Military Strategic Studies of the NDUU*, no. 3(55), pp. 109–112, 2015. (in Ukrainian)
- [17.] O. K. Molodid, *Transportation Problem: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. (in Ukrainian)
- [18.] Central Directorate for Provision of Aviation and Air Defense of the Armament of Logistics Forces Command of the Armed Forces of Ukraine, "Act on the implementation of the results of the dissertation research," Ref. No. 2121, Jan. 30, 2026. (in Ukrainian)

## ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СТРУКТУР ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-140-146

УДК 528.7:614.8

<sup>1</sup>Бас Олег Володимирович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-2401-9457>

<sup>1</sup>Мирошник Олег Миколайович (доктор технічних наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0001-8951-9498>

<sup>2</sup>Федоров Олексій Валерійович

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

<sup>1</sup>Харченко Сергій Олександрович

<https://orcid.org/0009-0005-3071-966X>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

Рукопис надійшов до редакції: 10.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 05.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

### МЕТОДИКА НАТУРНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ОСЕРЕДКУ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ ЗА ДАНИМИ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ З БПЛА DJI MAVIC 3

У статті обґрунтовано методику натурної верифікації аналітичного методу оперативного визначення площі осередку надзвичайної ситуації природного характеру. Метод ґрунтується на геометричній моделі проєкції кадру на горизонтальну поверхню місцевості з урахуванням висоти БПЛА та кута нахилу оптичної осі камери. На відміну від спрощених підходів, у роботі деталізовано не лише формули для визначення загальної площі проєкції кадру, а й математичну схему розрахунку площ окремих зон у режимі похилого знімання коли проєкція набуває трапецієподібної форми. Сформульовано наукову гіпотезу дослідження, визначено критерії прийнятності та показники статистичного оцінювання результатів. Описано вимоги до контрольного полігону, план експерименту, порядок польотів, процедуру опрацювання результатів та систему обчислення похибок. Запропоновано підхід до врахування невизначеностей висоти, кута підвісу та параметрів поля зору, а також порядок введення корекційних коефіцієнтів у разі виявлення систематичних відхилень. Практичне значення розробленої методики полягає у створенні відтворюваної процедури перевірки придатності аналітичного методу для оперативного застосування підрозділами цивільного захисту безпосередньо в районі надзвичайної ситуації.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, аерофотознімання, осередок надзвичайної ситуації, моделювання, площа зони ураження, натурна верифікація, геометрична модель проєкції, DJI Mavic 3, оперативне реагування.

#### Вступ

Оперативне визначення просторових параметрів осередку надзвичайної ситуації природного характеру є одним із ключових елементів інформаційного забезпечення реагування. На основі розрахунків площі зони надзвичайної ситуації, що пов'язані зі підтоплення, торф'яною або лісовою пожежею визначається обсяг сил і засобів необхідних для ліквідації, отримані дані слугують підставою для прогнозування розвитку події [1, 2, 3]. За умов дефіциту часу традиційні наземні способи вимірювання є або надто повільними, або

небезпечними для застосування безпосередньо в осередку події.

БПЛА суттєво розширили можливості первинної оцінки обстановки в районі надзвичайної ситуації. Втім практична цінність аерофотознімка визначається не самим фактом отримання зображення, а наявністю формалізованого методу переходу від параметрів кадру до реальних лінійних і площинних характеристик місцевості. Саме тому в попередніх напрацюваннях авторів запропоновано аналітичний метод оцінювання площі осередку надзвичайної ситуації за одиночним аерознімком із БПЛА DJI Mavic 3,

побудований на геометрії центральної проєкції та зонувани кадру [4–8].

Проте теоретична коректність геометричних залежностей ще не є достатньою підставою для практичного застосування. Щоб метод міг реально використовуватися підрозділами цивільного захисту, необхідно встановити, у яких режимах знімання аналітична модель забезпечує прийнятну точність, які чинники формують систематичні й випадкові відхилення та чи потребує метод калібрування для конкретної моделі БПЛА. Саме тому необхідно провести натурний експеримент із чітко регламентованою процедурою, яка передбачатиме перевірку працездатності даного методу.

Застосування БПЛА для картографування, дистанційного зондування та підтримки рішень у кризових умовах упродовж останніх десяти років стало самостійним напрямом досліджень. У фундаментальному огляді Colomina та Molina показано, що безпілотні авіаційні системи сформували окремий прикладний сегмент фотограмметрії та дистанційного зондування, де поєднання мобільності, гнучкості маршруту й високої просторової роздільної здатності дає переваги, недосяжні для традиційних засобів спостереження [4]. Rajares, розглядаючи застосування UAV у дистанційному зондуванні, дійшов висновку, що в оперативних сценаріях вирішальною часто є не абсолютна точність, а можливість швидко отримати метрично придатну оцінку без камерального опрацювання [5].

У сфері цивільного захисту України питання використання БПЛА для спостереження та оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій досліджували Мосов С. В., Хижняк В. В., Литовченко А. О., Ядченко Д. В. та ін., обґрунтувавши функції безпілотної авіації при реагуванні на події та підтримці оперативних служб [1, 2, 3]. Прикладні аспекти, а саме рух БПЛА в зоні надзвичайної ситуації, технічний зір, протимінна діяльність висвітлено в роботах Ковальова О. О., Неклонського І. М., Ткачука А. Г., Кравчука А. Р., Баса О. В., Давиденка М. М. [11, 12, 13]. Ці дослідження утворюють важливу прикладну базу, однак жодне з них не розв'язує задачу швидкого визначення площі осередку НС за одним кадром без побудови фотограмметричної моделі місцевості.

Розвиток безпілотних літальних апаратів в Україні й світі в контексті завдань цивільного захисту аналізували Лаврівський М. З. та Гаврись А. П. [14]; методи керування БПЛА і їхній вплив на точність вимірювальних завдань розглядали Микійчук М. М. і Зіганшин Н. С. [15]. Перспективний напрям автоматизації визначення коефіцієнтів заповнення  $\eta$  при зональній оцінці площі окреслено в роботі Стасенка Д. В. та Яковини В. С. через методи навігації БПЛА із застосуванням штучного інтелекту [16].

Геометрична основа методу спирається на класичні положення фотограмметрії, викладені у Wolf et al. та Luhmann et al. [7, 8]. Під час знімання,

коли камера спрямована вертикально вниз зв'язок між висотою польоту, кутом поля зору і розмірами наземної проєкції добре описується аналітичними залежностями. Однак у режимі похилого знімання, особливо при малих висотах, суттєво зростає чутливість до похибок кута підвісу й висоти, а спрощене припущення про рівність зон кадру перестав виконуватися в наземних координатах. Термінологічну та методологічну основу дистанційного зондування в Україні встановлено

ДСТУ 4220-2003 [6]; технічні характеристики камери DJI Mavic 3 наведено у специфікації виробника [9]; власні попередні напрацювання авторів із верифікації методів ідентифікації об'єктів БПЛА описано в [10].

Проте незважаючи на широке охоплення загальних питань застосування БПЛА в надзвичайних умовах, у науковій літературі відсутня відтворювана методика натурної верифікації оперативного методу визначення площі осередку НС, яка враховувала б зональну структуру проєкції.

### Матеріали та методи

У роботі застосовано комплекс взаємопов'язаних методів: аналітичне геометричне моделювання, методи прикладної фотограмметрії та статистичного аналізу, методи проведення натурального експерименту.

Теоретичну основу методу становить модель центральної проєкції кадру на горизонтальну поверхню місцевості [7, 8]. Положення камери описується двома параметрами: висотою  $H$  над опорною поверхнею та кутом нахилу  $\gamma$  підвісу відносно вертикалі. Якщо місцевість у межах одного кадру має локальний перепад висот  $\Delta h$ , у розрахунках використовується ефективна висота знімання  $H_{ef} = H - \Delta h$ ; за горизонтальної поверхні  $H_{ef} = H$ .

Параметри поля зору камери DJI Mavic 3 діагональний кут  $\varphi d = 84^\circ$  та роздільна здатність  $5280 \times 3956$  пікс. [9], перераховуються в половинні кути поля зору:  $\beta_x \approx 35,8^\circ$  (поперечний) та  $\beta_y \approx 28,35^\circ$  (поздовжній). Ці значення є сталими параметрами моделі й не змінюються між режимами знімання.

Метод реалізує дві розрахункові схеми залежно від кута нахилу камери.

Режим вертикального знімання відповідає положенню  $\gamma = -90^\circ$ , за якого кут відхилення оптичної осі від вертикалі  $\alpha = 90^\circ - |\gamma| = 0^\circ$ . Проєкція кадру на місцевість наближається до прямокутника, а її розміри та площа визначаються формулами:

$$H_{ef} = H - \Delta h, \quad (1)$$

$$B_0 = 2H_{ef} \tan \beta_x, \quad (2)$$

$$L_0 = 2H_{ef} \tan \beta_y, \quad (3)$$

$$S_0 = 4H_{ef}^2 \tan \beta_x \tan \beta_y, \quad (4)$$

Режим похилого знімання відповідає  $\gamma > -90^\circ$ , тобто  $\alpha > 0^\circ$ . За цих умов ближня і дальня межі кадру мають різні поздовжні координати, а форма

проекції є трапецієподібною. Поздовжні координати меж:

$$x_1 = H_{\text{эф}} \tan(\alpha - \beta_y), \quad (5)$$

$$x_2 = H_{\text{эф}} \tan(\alpha + \beta_y), \quad (6)$$

Поздовжній розмір проекції:

$$L = x_2 - x_1. \quad (7)$$

Похили відстані від центра проекції до ближньої та дальньої меж:

$$R_1 = \sqrt{H_{\text{эф}}^2 + x_1^2}, \quad (8)$$

$$R_2 = \sqrt{H_{\text{эф}}^2 + x_2^2}, \quad (9)$$

Ширини кадру по межах і площа трапецієподібною проекції:

$$B_1 = 2R_1 \tan \beta_x, \quad (10)$$

$$B_2 = 2R_2 \tan \beta_x, \quad (11)$$

$$S = \frac{B_1 + B_2}{2} L, \quad (12)$$

У спрощених підходах площа осередку НС оцінювалася через рівновеликий поділ кадру на 9 комірок:  $S_{j,k} = S_0/9$ . Для вертикального режиму таке наближення є прийнятним і усі комірки мають однакові наземні площі. Для похилого режиму рівність комірок у наземних координатах не виконується: дальній пояс охоплює значно більшу площу, ніж ближній. З цієї причини в роботі запроваджено уточнену схему зонування.

Нормована вертикальна координата  $v$  системи зображення визначається в інтервалі  $[-1; 1]$ . Межі трьох горизонтальних поясів задаються виразом:

$$v_j = -1 + \frac{2j}{3}, j = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Поздовжня координата  $j$ -ї межі на місцевості:

$$x_j = H_{\text{эф}} \cdot \tan(\alpha + \arctan(v_j \cdot \tan \beta_y)). \quad (14)$$

Ширина кадру на  $j$ -й межі:

$$B_j = 2 \sqrt{H_{\text{эф}}^2 + x_j^2} \tan \beta_x, \quad (15)$$

Площа  $j$ -го горизонтального поясу (трапеція між межами  $j$  і  $j+1$ ):

$$A_j = \frac{B_j + B_{j+1}}{2} (x_{j+1} - x_j), j = 1, 2, 3. \quad (16)$$

Оскільки кожна з трьох вертикальних смуг кадру займає рівну частку його ширини (1/3), площа окремої комірки ( $j, k$ ) в першому наближенні дорівнює:

$$S_{j,k} = A_j / 3, \quad k = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Орієнтовна площа осередку НС обчислюється як зважена сума площ комірок:

$$S_{\text{НС}} = \sum \sum \eta_{j,k} \cdot S_{j,k}, \quad (18)$$

де  $\eta_{j,k} \in [0,1]$  – коефіцієнт заповнення комірки осередком НС, що визначається оператором візуально або автоматизовано засобами комп'ютерного зору [16].

Формули (16) – (17) усувають концептуальну похибку рівновеликого зонування трапецієподібною проекції й підвищують математичну коректність методу при похилому зніманні.

Аналітична модель використовує виміряні або телеметрично отримані параметри  $H_{\text{эф}}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta_x$ ,  $\beta_y$ , тому точність результатів безпосередньо залежить від похибок цих величин. Для вертикального режиму відносна комбінована невизначеність площі у першому наближенні:

$$u_r(S_0) \approx \sqrt{\left(2 \frac{u(H_{\text{эф}})}{H_{\text{эф}}}\right)^2 + \left(\frac{\sec^2 \beta_x}{\tan \beta_x} u(\beta_x)\right)^2 + \left(\frac{\sec^2 \beta_x}{\tan \beta_x} u(\beta_x)\right)^2}. \quad (19)$$

Для похилого режиму аналітичний вираз є складнішим через нелінійну залежність від  $\alpha$ , тому оцінка проводиться числовим варіюванням вхідних параметрів у межах їхніх похибок (метод чутливості):  $\delta H = \pm 0,1$  м,  $\delta \gamma = \pm 1^\circ$ ,  $\delta \varphi d = \pm 0,5^\circ$ . За результатами такого аналізу встановлюється, які параметри найбільше впливають на похибку і потребують першочергового контролю під час польоту.

Натурні випробування проводяться із застосуванням такого комплексу обладнання:

БПЛА DJI Mavic 3 з основною ширококутною камерою ( $\varphi d = 84^\circ$ ,  $5280 \times 3956$  пікс.) [9] – основний вимірювальний засіб;

мобільний додаток DJI Fly – керування польотом, контроль висоти та кута підвісу за телеметрією;

рулетка з діапазоном не менше 30 м і ціною поділки 1 мм – наземні вимірювання контрольного полігону;

контрастні тканинні мітки розміром не менше  $0,5 \times 0,5$  м – маркування кутових точок і ліній полігону;

табличний процесор (Google Sheets) – фіксація вимірювань, обчислення похибок, статистичний аналіз.

Статистичне оцінювання похибок. Для кожного виміряного параметра  $X$  та  $i$ -го спостереження обчислюється абсолютне відхилення:

$$\Delta_i = X_{\text{експ}}^{(i)} - X_{\text{розр}}^{(i)}, \quad (20)$$

Відносна похибка для одного спостереження:

$$\delta_i = \frac{|\Delta_i|}{X_{\text{експ}}^{(i)}} \cdot 100\%. \quad (21)$$

За серією з  $n \geq 3$  повторень для одного режиму розраховуються:

середнє зміщення:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (22)$$

середня абсолютна відносна похибка:

$$Mape = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (23)$$

середньоквадратична похибка:

$$Rmse = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{експ}^i - X_{поз}^i)^2} \quad (24)$$

а також стандартне відхилення повторень:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X^i - \bar{X})^2} \quad (25)$$

Наукова гіпотеза вважається підтвердженою, якщо для більшості досліджуваних режимів одночасно виконуються такі умови:  $\bar{\Delta} \leq 15\%$  для площинних параметрів;  $|Bias|$  є статистично незначущим або компенсується стабільним корекційним коефіцієнтом; внутрішньосерійна варіація між повтореннями не виходить за межі; прийнятні для оперативного застосування.

### Результати

Метод коректно застосовується за таких умов: місцевість у межах кадру є горизонтальною; параметри поля зору камери відомі; висота польоту і кут підвісу фіксуються з прийнятною точністю; оптичні спотворення є незначущими або компенсовані внутрішньою обробкою камери. За цих умов формули (2) – (12) описують геометрію кадру аналітично.

Порівняння спрощеної формули  $S_{j,k} = S_0/9$  з уточненою  $S_{j,k} = A_j/3$  засвідчує, що при  $\gamma = -70^\circ$  і  $H = 15$  м площа дальнього поясу перевищує площу ближнього. Отже, спрощена схема може занижувати площу осередку, якщо він зосереджений у дальній зоні кадру. Уточнена схема за формулами (13) – (17) усуває цю систематичну похибку.

Натурна верифікація спрямована на встановлення відповідності між розрахунковими геометричними параметрами кадру та фактичними наземними розмірами, отриманими в реальному польовому експерименті. Перевірці підлягають: загальна площа охоплення; форма проєкції; ширини  $B_1$ ,  $B_2$ ; поздовжній розмір  $L$ ; площі поясів  $A_j$  і комірок  $S_{j,k}$ ; інтегральна похибка визначення площі умовного осередку НС.

Контрольний полігон задовольняє таким вимогам: відкрита рівна поверхня з перепадом висот у межах кадру не більше 0,1 м; відсутність об'єктів, що спотворюють проєкцію або

ускладнюють виконання польотів; площа, достатня для розміщення контрольної фігури найбільшого розміру (при  $\gamma = -70^\circ$ ,  $H = 15$  м:  $L \approx 35-40$  м,  $B_2 \approx 40-45$  м). Наземне маркування відтворює межі поясів і комірок сітки  $3 \times 3$ ; геодезичні вимірювання фіксують еталонні розміри до початку польотів.

План натурного експерименту охоплює дев'ять комбінацій режимів знімання:  $H = 5; 10; 15$  м та  $\gamma = -90^\circ; -80^\circ; -70^\circ$ . Для кожного режиму виконується не менше трьох повторень, загалом 27 знімальних сесій, що уможливило оцінювання внутрішньосерійної варіації за критерієм Грабса.

Керовані змінні висота  $H$  і кут підвісу  $\gamma$ . Контрольовані умови: швидкість вітру ( $< 5$  м/с), освітленість (без прямого засліплення), стан поверхні (суха, без снігового покриву), горизонтальне зміщення апарата відносно центру контрольної фігури ( $\leq 0,5$  м). Потенційні джерела похибок: барометрична невизначеність висоти ( $\pm 0,1$  м), мікрокрен і мікротангаж апарата ( $\leq 1^\circ$ ), неточність виставлення кута підвісу ( $\pm 1^\circ$ ), локальні нерівності полігону.

Послідовність одного знімального циклу: підготовка і перевірка полігону; контроль технічного стану БПЛА; зліт і стабілізація на заданій висоті; виставлення кута підвісу; фіксація телеметрії; серія з 3 замірів та кадрів; документування умов у польовому журналі; перехід до наступного режиму.

На етапі опрацювання для кожного знімка ідентифікуються контрольні точки та межі маркованої фігури, встановлюються фактичні лінійні параметри наземної проєкції через масштабування за контрольними точками, обчислюються площі поясів і комірок. Паралельно для тих самих значень  $H$  та  $\gamma$  розраховуються теоретичні значення  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $L$ ,  $S$ ,  $A_j$ ,  $S_{j,k}$  за формулами (2) – (17). Попарне зіставлення розрахункових і натурних значень формує масив похибок для статистичного аналізу.

У разі виявлення стійкого систематичного відхилення для певних режимів допускається введення режимозалежних корекційних коефіцієнтів:

$$B_{кор} = k_B(H, \alpha) \cdot B, \quad (26)$$

$$S_{кор} = k_S(H, \alpha) \cdot S. \quad (27)$$

На відміну від глобального калібрування, режимозалежні коефіцієнти точніше відображають фізичну природу похибок: для похилих режимів систематичне зміщення пов'язане насамперед із нелінійністю залежностей від  $\alpha$ , тоді як для вертикального режиму домінує барометрична похибка висоти.

### Обговорення

Наукова новизна запропонованої методики виявляється у кількох аспектах. Процедура верифікації аналітичної моделі виокремлено в самостійний дослідницький об'єкт і формалізовано не лише на рівні загальної площі кадру, а й на рівні зональної структури проєкції. Введено уточнену

математичну схему розрахунку площ окремих комірок сітки  $3 \times 3$  при похилому зніманні (формули 13–17), що усуває концептуальну похибку рівновеликого зонування, притаманну попереднім спрощеним підходам. Розроблено систему кількісних критеріїв оцінювання придатності методу, яка поєднує геометричні параметри, статистичні характеристики похибок і процедуру режимозалежного калібрування.

Вибір порогу прийнятності  $\Delta \leq 15\%$  потребує окремого обґрунтування. Геодезичні методи забезпечують відносну похибку визначення площ на рівні 1–3%, проте потребують розгортання спеціального обладнання і часу від кількох годин до доби. Повне фотограмметричне опрацювання знімального маршруту БпЛА дає 5–10% при правильно виставленій GCP-мережі, але також не виключає тривалого камерального етапу. Метод, що верифікується, розрахований на отримання результату в полі впродовж 5–15 хв, тому поріг 15% є прийнятним компромісом між швидкістю та точністю. За умови підтвердження цього порогу метод займає нішу між суб'єктивною візуальною оцінкою (похибка 30–50%) і повноцінним фотограмметричним опрацюванням.

Щодо очікуваної поведінки моделі в різних режимах знімання: при  $\gamma = -90^\circ$  головним джерелом систематичної похибки є барометрична невизначеність висоти польоту, яка дає відносну похибку площі порядку  $2 \cdot \delta_H / H$ . При  $H = 5 \text{ м}$  і  $\delta_H = 0,1 \text{ м}$  це близько 4%, що є прийнятним. При  $\gamma = -70^\circ$  основним чинником стає похибка кута підвісу  $\delta_\gamma$ : через нелінійність залежності  $x_2$  від  $\alpha$  похибка дальньої ширини  $B_2$  може сягати 10–15% уже при  $\delta_\gamma = 1^\circ$ . Якщо аналіз невизначеності (формула 19 та числове варіювання) вкаже на систематичне перевищення порогу для похилих режимів, це стане підставою для обмеження рекомендованого діапазону кутів підвісу або введення корекційних коефіцієнтів (26) – (27).

Порівняння двох схем зонування показує, що уточнена ( $S_{j,k} = A_j/3$ ) дає систематично відмінні результати лише для похилих режимів. При  $\gamma = -90^\circ$  обидва підходи збігаються, оскільки  $A_j = S_0/3$  для прямокутної проекції. Це підтверджує коректність спрощення у вертикальному режимі і водночас доводить необхідність уточненої схеми для похилого. Натурна верифікація дозволить встановити, починаючи з якого кута нахилу різниця між схемами стає практично значною.

Перспективним розвитком методу є автоматизоване визначення коефіцієнтів  $\eta_{j,k}$  методами сегментації зображень або класифікації пікселів. Роботи з навігації та ідентифікації об'єктів із застосуванням штучного інтелекту [16] вказують на принципову можливість такого розширення. У поточній версії методу  $\eta_{j,k}$  визначається оператором, що вносить суб'єктивну складову; кількісна оцінка відповідної похибки є самостійним завданням подальших досліджень.

Методика є відтворюваною: вона детально регламентує умови польоту, вимоги до полігону, порядок вимірювань і розрахунків. Будь-яка

науково-дослідна установа або підрозділ цивільного захисту може відтворити випробування й порівняти результати. Стандартизація цієї процедури є необхідною умовою для включення методу до нормативно-методичних документів системи цивільного захисту України.

Основним обмеженням методу залишається припущення про горизонтальність місцевості в межах кадру. За істотно пересіченого рельєфу або наявності вертикальних об'єктів в осередку НС (будівлі, дерева, дамби) потрібно або вводити детальнішу корекцію на рельєф, або переходити до повноцінного фотограмметричного опрацювання. У таких ситуаціях результат методу слід розглядати виключно як первинну наближену оцінку, що підлягає обов'язковому уточненню.

### Висновки

Розроблено цілісну методику натурної верифікації аналітичного методу визначення площі осередку надзвичайної ситуації природного характеру за одиночним аерознімком із БпЛА DJI Mavic 3.

Сформульовано наукову гіпотезу, визначено контрольовані змінні та прийнятний критерій точності: середня абсолютна відносна похибка площинних параметрів  $\bar{\Delta} \leq 15\%$ , обґрунтований порівнянням з наявними методами визначення площ у задачах оперативного реагування.

Розроблено план натурного експерименту для дев'яти режимів знімання (27 сесій) та систему статистичного оцінювання за показниками *Mape*, *Rmse*, систематичного зміщення і варіації між повтореннями. За наявності систематичних відхилень передбачено введення режимозалежних корекційних коефіцієнтів  $k_B(H, \alpha)$  та  $k_S(H, \alpha)$ .

Практичним результатом роботи є науково обґрунтована відтворювана процедура, реалізація якої дозволить встановити оптимальні режими знімання для польового застосування методу, визначити межі його придатності та за потреби провести режимозалежне калібрування для апарата DJI Mavic 3.

### Список використаних джерел

- [1.] С. В. Мосов, В. В. Нероба та О. В. Селюков, "Особливості застосування безпілотного літального апарата в надзвичайних ситуаціях," Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, № 1(9), с. 34–41, 2020. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.34-41>
- [2.] С. В. Мосов, В. В. Хижняк, А. О. Литовченко та Д. В. Ядченко, "Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації в сфері цивільного захисту України," Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, № 2(12), с. 54–68, 2021. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68)
- [3.] Д. В. Ядченко, С. В. Мосов, А. О. Литовченко та В. В. Хижняк, "Особливості використання безпілотної авіації іноземними країнами для оцінювання збитків від надзвичайних ситуацій," Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, № 1(11), с. 33–43, 2021. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1.33-43>
- [4.] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,"

- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 92, pp. 79–97, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- [5.] G. Pajares, "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 81, no. 4, pp. 281–329, 2015, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>.
- [6.] Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять, ДСТУ 4220-2003. Київ, Україна: Держстандарт України, 2003.
- [7.] P. R. Wolf, B. A. DeWitt, and B. E. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [8.] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2nd ed. Berlin, Germany: De Gruyter, 2014, <https://doi.org/10.1515/9783110302783>.
- [9.] DJI, "Mavic 3 Series – Specifications," DJI Official Website, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.dji.com/mavic-3/specs>
- [10.] О. Бас, О. Землянський, О. Мирошник та О. Авраменко, "Експериментальний метод виявлення та ідентифікування наземних мін безпілотними літальними апаратами," *Повітряна міць України*, № 1(6), с. 124–130, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-124-130>.
- [11.] О. О. Ковальов та І. М. Неклонський, "Модель руху безпілотного літального апарату в зоні надзвичайної ситуації," у *Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф.* Проблеми надзвичайних ситуацій – 2023, 2023, с. 239–240.
- [12.] А. Г. Ткачук та А. Р. Кравчук, "Автоматизована система виявлення пожеж на базі БПЛА з використанням технічного зору," у *Матеріали конф. Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення*, Житомир, Україна, 2023.
- [13.] О. В. Бас та М. М. Давиденко, "Проблемні питання розроблення БПЛА комплексів для розмінування території," у *Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених*, Черкаси, Україна: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023, с. 227–229.
- [14.] М. З. Лаврівський та А. П. Гавриш, "Розвиток безпілотних літальних апаратів в Україні та світі для виконання завдань цивільного захисту," *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 27(1), с. 151–153, 2017. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntlu\\_2017\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntlu_2017_27)
- [15.] М. М. Микійчук та Н. С. Зіганшин, "Аналіз методів керування безпілотними літальними апаратами," 2019. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jan/20507/005.pdf>
- [16.] Д. В. Стасенко та В. С. Яковина, "Аналіз наявних методів і засобів удосконалення навігації БПЛА з використанням штучного інтелекту," *Scientific Bulletin of UNFU*, т. 33, № 4, с. 78–83, 2023, <https://doi.org/10.36930/40330411>.

<sup>1</sup>Oleh Bas (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-2401-9457>

<sup>1</sup>Oleh Myroshnyk (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-8951-9498>

<sup>2</sup>Oleksii Fedorov

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

<sup>1</sup>Serhii Kharchenko

<https://orcid.org/0009-0005-3071-966X>

<sup>1</sup>National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

<sup>2</sup>Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

## **METHODOLOGY FOR FIELD VERIFICATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE AREA OF A NATURAL EMERGENCY FOCUS BASED ON AERIAL IMAGERY FROM A DJI MAVIC 3 UAV**

*The article substantiates a methodology for the field verification of an analytical method for the onepamuve determination of the area of a natural emergency focus. The method is based on a geometric model of image projection onto a horizontal ground surface, taking into account the UAV flight altitude and the angle of inclination of the camera's optical axis. Unlike simplified approaches, the study details not only the formulas for determining the total area of the image projection, but also the mathematical scheme for calculating the areas of individual zones in the oblique imaging mode, when the projection acquires a trapezoidal shape. The research hypothesis is formulated, and the acceptance criteria and indicators for statistical evaluation of the results are defined. The requirements for the control test site, the experimental plan, the flight procedure, the results processing procedure, and the error calculation system are described. An approach is proposed for accounting for uncertainties in altitude, gimbal angle, and field-of-view parameters, as well as the procedure for introducing correction coefficients when systematic deviations are detected. The practical significance of the developed*

methodology lies in creating a reproducible procedure for testing the suitability of the analytical method for operational use by civil protection units directly in the emergency area.

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, UAV, aerial imaging, emergency focus, affected area, field verification, geometric projection model, DJI Mavic 3, emergency response.*

### References

- [1.] S. V. Mosov, V. V. Neroba, and O. V. Sieliukov, "Features of the application of an unmanned aerial vehicle in emergency situations," *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 1(9), pp. 34–41, 2020. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.34-41> (in Ukrainian)
- [2.] S. V. Mosov, V. V. Khyzhniak, A. O. Lytovchenko, and D. V. Yadchenko, "Classification, functions and tasks of unmanned aviation in the field of civil protection of Ukraine," *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 2(12), pp. 54–68, 2021. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68) (in Ukrainian)
- [3.] D. V. Yadchenko, S. V. Mosov, A. O. Lytovchenko, and V. V. Khyzhniak, "Features of the use of unmanned aviation by foreign countries to assess damage from emergencies," *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 1(11), pp. 33–43, 2021. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.1.33-43> (in Ukrainian)
- [4.] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, pp. 79–97, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- [5.] G. Pajares, "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 81, no. 4, pp. 281–329, 2015, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>.
- [6.] *Earth Remote Sensing from Space: Terms and Definitions*, DSTU 4220-2003. Kyiv, Ukraine: Derzhstandart of Ukraine, 2003. (in Ukrainian)
- [7.] P. R. Wolf, B. A. DeWitt, and B. E. Wilkinson, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [8.] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2nd ed. Berlin, Germany: De Gruyter, 2014, <https://doi.org/10.1515/9783110302783>.
- [9.] DJI, "Mavic 3 Series – Specifications," DJI Official Website, 2022. [Online]. Available: <https://www.dji.com/mavic-3/specs>
- [10.] O. V. Bas, O. Zemlianskyi, O. Myroshnyk, and O. Avramenko, "Experimental method of detection and identification of land mines by unmanned aerial vehicles," *Air Power of Ukraine*, no. 1(6), pp. 124–130, 2024, <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-124-130> (in Ukrainian)
- [11.] O. O. Kovaliov and I. M. Neklonskyi, "Model of movement of an unmanned aerial vehicle in an emergency zone," in *Proc. Int. Sci. Pract. Conf. Problems of Emergencies - 2023*, 2023, pp. 239–240. (in Ukrainian)
- [12.] A. H. Tkachuk and A. R. Kravchuk, "Automated fire detection system based on UAV using technical vision," in *Proc. Conf. Computer Technologies: Innovations, Problems, Solutions, Zhytomyr, Ukraine, 2023*. (in Ukrainian)
- [13.] O. V. Bas and M. M. Davydenko, "Problematic issues of developing UAV complexes for territory demining," in *Proc. All-Ukrainian Sci. Pract. Conf. Science of Civil Protection as a Way of Formation of Young Scientists*, Cherkasy, Ukraine: CHIPB named after Heroes of Chernobyl NUCDU, 2023, pp. 227–229. (in Ukrainian)
- [14.] M. Z. Lavrivskyi and A. P. Havrys, "Development of unmanned aerial vehicles in Ukraine and the world to perform civil protection tasks," *Scientific Bulletin of UNFU*, no. 27(1), pp. 151–153, 2017. [Online]. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlit\\_2017\\_27](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnlit_2017_27). (in Ukrainian)
- [15.] M. M. Mykyichuk and N. S. Zihanshyn, "Analysis of control methods of unmanned aerial vehicles," 2019. [Online]. Available: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jan/20507/005.pdf>. (in Ukrainian)
- [16.] D. V. Stasenko and V. S. Yakovyna, "Analysis of existing methods and means of improving UAV navigation using artificial intelligence," *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 33, no. 4, pp. 78–83, 2023, <https://doi.org/10.36930/40330411> (in Ukrainian)

## ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВАГИ В ПОВІТРІ

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-147-154**

**УДК 355.358**

<sup>1</sup>**Луцевят Олександр Іванович**

<https://orcid.org/0009-0001-2435-5434>

<sup>2</sup>**Ярошенко Ярослав Віталійович** (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

<sup>2</sup>**Ткаченко Анатолій Володимирович**

<https://orcid.org/0000-0001-7316-5437>

<sup>3</sup>**Садовий Костянтин Віталійович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2703-9696>

<sup>1</sup>*Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна*

<sup>2</sup>*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

<sup>3</sup>*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 09.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 26.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ЕВАКУАЦІЇ ПОРАНЕНИХ З ПОЛЯ БОЮ

Значні втрати особового складу Збройних Сил України та вразливість наземних засобів евакуації зумовлюють потребу в пошуку нестандартних технічних рішень. Застосування важких безпілотних літальних апаратів дозволить суттєво підвищити швидкість і безпечність порятунку поранених. Метою статті є визначення базових технічних вимог та орієнтовної компоувальної схеми безпілотного літального апарату мультикоптерного типу для евакуації поранених з поля бою. У статті використані загальнонаукові методи дослідження: аналіз, синтез та SWOT-аналіз характеристик існуючих цивільних безпілотних літальних апаратів (eVTOL) вантажопідійомністю близько 200 кг. В роботі сформовано основні вимоги до безпілотного літального апарату: корисне навантаження 150–170 кг, радіус дії до 20 км, час польоту 20–25 хв. За результатами SWOT-аналізу доведено, що оптимальним є 12-ти двигунне компоування. Воно гарантує високу відмовостійкість, оптимальні габарити (близько 2,6х2,6 м) та дозволяє використовувати доступні серійні компоненти.

Стаття буде корисною для розробників військової техніки, інженерів та представників медичних підрозділів під час формування тактико-технічних вимог до новітніх засобів аеромедичної евакуації.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, евакуація поранених, силова установка безпілотного літального апарату.

#### Вступ

Значні втрати особового складу внаслідок поранень та загибелі особового складу під час російсько-української війни вимагають пошуку дієвих шляхів забезпечення своєчасної евакуації поранених (травмованих) з поля бою для негайного надання необхідної медичної допомоги. До недавнього часу евакуація поранених з поля бою переважно здійснювалася класичним способом – із залученням евакуаційних груп, які оснащені ношами та візками різних типів, а також з використанням “класичної” евакуаційної техніки – спеціалізованих та/або неспеціалізованих (цивільних) транспортних засобів (броньованих автомобілів, спеціалізованих евакуаційних засобів на базі БТР, БМП тощо) під керуванням екіпажів, що перебувають в них безпосередньо.

Водночас, починаючи із 2024 року, з метою мінімізації втрат серед особового складу евакуаційних груп, а також підвищення швидкості та безпечності евакуації поранених підрозділами сил оборони України активно застосовуються відповідні безпілотні наземні комплекси (платформи). Їх застосування дозволяє не залучати особовий склад евакуаційних груп для евакуації поранених у найбільш небезпечних зонах ведення бойових дій (у безпосередній близькості від лінії безпосереднього зіткнення). Проте, сучасні умови ведення бойових дій не завжди дозволяють оперативно виконувати це завдання навіть з використанням таких безекіпажних комплексів (платформ). Противник намагається здійснювати постійний (цілодобовий) моніторинг поля бою на глибину до 20 км в режимі реального часу, активно проводить заходи з виявлення

евакуаційних груп (засобів) та завдає по них удари під час проведення евакуації. Такі дії противника значно ускладнюють застосування зазначених вище засобів евакуації (як “класичних”, так і безекіпажних наземних), підвищують рівень неповоротних втрат особового складу (як персоналу евакуаційних груп, так і поранених осіб) та дороговартісної техніки. При цьому одним із ключових недоліків усіх цих засобів евакуації є висока залежність ефективності їх застосування від умов місцевості, які можуть суттєво обмежувати маневреність, швидкість та безпечність евакуації.

Зазначене вище зумовлює доцільність пошуку відповідних технічних рішень щодо створення евакуаційних засобів на базі безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що дозволить підвищити швидкість та безпечність евакуації поранених у складних та небезпечних умовах.

**Метою статті** є визначення технічних вимог до БпЛА для евакуації поранених з поля бою.

### Матеріали та методи

У даній роботі використанні загальнонаукові методи дослідження: аналіз, синтез, SWOT-аналіз. Основними матеріалами, що використовуються в дослідженні, є роботи, що в загальному вигляді аналізують доцільність використання БпЛА в медичних заходах (для перевезення пацієнтів,

пошук та порятунок, доставки медичного обладнання, як то дефібрилятору до пацієнта, медичних ліків тощо) в цивільному середовищі [1-2], характеристики БпЛА, на базі яких можуть бути створені евакуаційні засоби, що одержані з відкритих джерел [3], у тому числі відповідних презентаційних матеріалів виробників цих апаратів [4-5] та комплектуючих до них [9-14], а також аналітичні матеріали про використання БпЛА [6-8].

### Результати

У цивільній сфері, для надання транспортних послуг з перевезення осіб, виконання логістичних завдань з перевезення вантажів та специфічних завдань в сільському господарстві і промисловості, все активніше використовуються важкі БпЛА мультикоптерного типу (МТ), у тому числі електричні літальні апарати вертикального зльоту та посадки (eVTOL) з вантажопідйомністю ~200 кг [2-8]. Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що, така вантажопідйомність апарату є цілком достатньою для побудови на його базі евакуаційного засобу.

Відповідні експлуатаційні характеристики та конструктивні особливості низки БпЛА МТ (eVTOL) з вантажопідйомністю ~200 кг наведені у табл. 1.

Таблиця 1

**Експлуатаційні характеристики та конструктивні особливості БпЛА МТ (eVTOL) з вантажопідйомністю ~200кг**

Модель (виробник)	Вантажопідйомність (кг)	Конструктивні особливості	Призначення
Volocopter (Volo Drone)	~200	Багатороторна мультикоптерна конструкція (до 18 пропелерів)	Вантажні перевезення, логістика, агротехніка
EH216-S (EHang)	~220 kg (макс~ 220)	Мультикоптер eVTOL (16-ть пропелерів – 8-ми осьова конструкція з коаксіальними гвинтами)	Пасажирські перевезення, міські “airtaxi” на короткі маршрути
GRIFF 300 (GRIFF Aviation)	~225	8-ми мултироторна конструкція	Логістичні, рятувальні та індустріальні місії
Skytech-S400 (Skytech)	200–300	8-ми осьова конструкція, 16 пропелерів	Важкий вантажний мультикоптер (індустрія, логістика)
БпЛА МТ (eVTOL) (різні виробники з КНР)	~200	Різні мультикоптерні конфігурації (4/6/8-ми осьові і більше)	Вантажні перевезення, будівництво, сільське господарство тощо

Слід зауважити, що, серед переліку наведених у табл. 1 моделей, найбільш вдалим проектом, що варто розглянути, є EH216-S, який за даними виробника EHang [4] є сертифікованим для транспортування пасажирів повітрям. Більш детально його характеристики наведені у табл. 2.

Таблиця 2

**Технічні характеристики eVTOL типу EH216-S**

Параметри	Показник
Максимальна злітна вага, кг	~620
Корисне навантаження, кг	~220

Параметри	Показник
Габарити, м	~5.6–5.73x~1.93
Дальність польоту, км	~30–35
Час польоту, хв	~21–25
Максимальна швидкість, км/год	~130
Крейсерська швидкість, км/год	~100
Максимальна висота польоту, м	~3000
Матеріали конструкції	Вуглецевий композит / карбонова конструкція

Параметри	Показник
	корпусу
Кількість електродвигунів, од	16
Кількість пропелерів, од	16
Тип розташування	8 пар коаксіальних роторів (дві лопати на один вузол верх-низ)

З табл. 2 видно, що eVTOL типу EH216-S може задовольняти вимоги до евакуаційного засобу, насамперед, за вантажопідйомністю. Це досягається за рахунок відносно потужної силової установки, що використовується у його складі. При цьому слід враховувати, що EH216-S створювався як повітряне маршрутне таксі і тому має достатньо великі габарити (що не сприяє прихованості його застосування над полем бою), надмірну технологічну складність та високу вартість. Подібна ситуація складається і з іншими БпЛА МТ (eVTOL) цивільного призначення, кожен з яких створювався для виконання своїх специфічних завдань, до переліку яких не входила евакуація поранених з поля бою, але які для цього можуть використовуватися.

Тому доцільно уточнити базовий склад та компоновальну схему БпЛА МТ (eVTOL) як безпілотного літального евакуаційного засобу (БпЛЕЗ), орієнтуючись на технічні рішення, що реалізовані в існуючих БпЛА МТ (eVTOL) відповідної вантажопідйомності (~200 кг). З цією метою розглянемо, насамперед, ключові елементи БпЛА МТ (eVTOL), які визначають їх масо-габаритні характеристики, технічну складність та вартість, а саме – силову установку, що включає певну кількість електродвигунів з пропелерами.

За аналізом [5-8] можливо припустити класифікацію БпЛА МТ (eVTOL) залежно від тяги силової установки на 1 електродвигун, що наведено в табл. 3.

Таблиця 3

#### Класифікація БпЛА МТ (eVTOL) залежно від тяги силової установки на 1 електродвигун

Класифікація	Макс. тяга на 1 електродвигун, кг
Спеціалізований мультикоптер	до 10–15
Транспортувальник вантажів	20–40
Спеціалізований транспортувальник важких вантажів	50–80
Спеціалізовані eVTOL	80–120+

У зв'язку з особливістю польоту БпЛА МТ (eVTOL), створення підйомної сили лише за рахунок силової установки, до їх електродвигунів з кількістю обертів електродвигуна на кожен вольт живлення (KV), великим крутним моментом, а також необхідною кількістю обертів на хвилину (RPM), висуваються підвищені вимоги питомої потужності (висока потужність при мінімальній

власній вазі), надійності роботи, тривалості служби та енергоефективності. Тому, проведений аналіз [5-9] показує, що БпЛА (eVTOL) цивільного призначення для виконання специфічних завдань зазвичай комплектуються електродвигунами з максимальною тягою понад 50 кг, а саме: великими безщітковими двигунами постійного струму (BLDC), синхронними двигунами з постійними магнітами (PMSM) та осьовими двигунами потоку (ACM).

BLDC heavy-lift (типу “multirotor” або “outrunner”) – електродвигуни з показником ефективності 85%–90%, що найбільш придатні для використання в БпЛА МТ. Перевагами в застосуванні є відносна простота конструкції, висока надійність та швидкість реакції, низькі витрати на обслуговування, високий крутний момент під час зльоту (посадки). BLDC мають наступні характеристики: максимальна тяга: 50–80 кг (~50 кг – робоча верхня межа, 60–70 кг – короткочасний пік, 80+ кг – лише у стендових режимах); KV – 60–90; напруга – 12S–24S (50–100В); потужність – 10–25 кВт (пікова); пропелери – карбон 40”–52” (1,0–1,3 м); маса двигуна – 8–15 кг;

Електродвигуни типу PMSM з показником ефективності 90%–95% зазвичай застосовуються в пілотованих або спеціалізованих eVTOL. Перевагами в застосуванні є відмінна енергоефективність та продуктивність, низький рівень шуму, точна керуваність. Мають такі характеристики: максимальна тяга: 60–95 кг; потужність: 15–30 кВт; діаметр пропелера: 44”–62”;

Осьові двигуни – силові установки eVTOL класу, які завдяки своїм технічним рішенням (де е “осьовий”, а не традиційно “радіальний” напрямок магнітного поля ротора та статора) є найпотужнішим і найперспективнішим класом силових установок. Перевагами їх застосування є найвища питома потужність і продуктивність при мінімальних габаритах та вазі. Характеристиками ACM є максимальна тяга: 50–100+ кг; потужність: 20–80 кВт; відносно низькі RPM.

Основними особливостями осьових (axial-flux) силових установок є: надвисокий крутний момент, дуже висока питома потужність, часто працюють через прямий привід (без редуктора). Вони зазвичай не продаються у відкритому доступі, а закупаються через спеціальні контракти та впроваджуються у сертифіковані авіаційні проекти. Їх використання має низку фізичних обмежень:

потреба в пропелері з діаметром понад 40”–50”, що свою чергу призводить до значного шуму, експлуатаційних обмежень, руйнування або небезпеки від роторного диску значних розмірів;

значна потужність споживання (орієнтовно: для 50 кг тяги – 10–15 кВт, для 80 кг тяги – 25–30 кВт).

Слід зазначити, що хоча PMSM та ACM електродвигуни набагато потужніші, але при цьому є вони значно дорожчими та складнішими в виробництві, вимогливішими до системи

керування, а також знаходиться на ранній стадії промислового впровадження. Тому, з урахуванням питань загальної надійності, доступності та безпечності експлуатації у БпЛЕЗ доцільно використовувати не один електродвигун великої потужності (типу PMSM або АСМ), а певну кількість економічно та технологічно більш

доступних електродвигунів (типу BLDC heavy-lift) по 40–60 кг [5, 9-11].

Можливий перелік електродвигунів типу BLDC heavy-lift, що можуть бути застосовані у силових установках БпЛЕЗ, та їх ймовірні характеристики наведено в табл. 4.

Таблиця 4

**Перелік електродвигунів типу BLDC heavy-lift, що можуть бути застосовані у силових установках БпЛЕЗ, та їх ймовірні характеристики**

Модель електродвигуна	MAD V118 IPE V2.0	MAD V122 IPE V2.0	MAD V128L IPE V2.0	T-MOTOR U15L (KV43)
Габаритні розміри двигуна, мм	144,2 x 49	72 x 33,5	145 x 59	51.5 × 86
Вага двигуна, кг	1,42	1,6	1,9	3,6
Типовий робочий діапазон, KV	55	45	45	43
Максимальна тяга, кг	48	48	70	61.2
Максимальний крутний момент, Нм	24	19,8	43,9	32.32
Максимальна потужність, кВт	15,8	10,2		16
Пропелери, що рекомендуються до використання	G40×13.1	G40×13.1, G42×14	G47,5×17,4	NS47×18"
Злітна вага одного несучого гвинта, кг	13-16	16-20	20-26	-
Ефективність, %	> 81	> 91	> 85	> 92-95
Орієнтовна вартість одного двигуна, дол USA	827	875	911	-

Зазначені у табл. 4 електродвигуни зазвичай застосовують разом з великими безклапанними карбоновими дволопатевиими пропелерами або

складними 2–3 лопатевиими пропелерами. Варіанти пропелерів та їх характеристики наведені в табл. 5.

Таблиця 5

**Варіанти пропелерів, що використовуються у складі БпЛА МТ (eVTOL), та їх характеристики**

Назва / тип пропелера	Матеріал	Розмір (діаметр/крок) дюйми (мм)	Кількість лопатеї	Підйомна сила (залежно від двигуна), кг
T-Motor FA36.2×11.8	багатошаровий карбон	36.2" × 11.8" (≈920×300)	2-лопатевиий	до 45 кг
T-Motor G40×13.1	багатошаровий карбон	40" × 13.1" (≈ 1016 × 333)	3-лопати (доступні 2-х та 3-х лопатеви серії)	~15–20 кг
T-Motor G36×11.5	багатошаровий карбон	36" × 11.5" (≈ 914)	2 та 3-х лопатеви серії	~30–36 кг
Збірні великі карбонові пропелери	багатошаровий карбон (склопластик)	24"–63" (600–1600)	2 та 3-х лопатеви серії	до 40–80 кг

Довідково: Підйомна сила пропелера розраховується за формулою:  $T \approx CT \rho n^2 D^4$

де:  $T$  – статична тяга (N),

$CT$  – коефіцієнт тяги (залежить від профілю лопаті і їх кроку),

$\rho$  – густина повітря (~1.225 кг/м<sup>3</sup> при рівні моря),

$n$  – оберти в (об/с),

$D$  – діаметр пропелера (м).

Аналіз існуючих серійних та дослідних проєктів БпЛА МТ (eVTOL), а також їх характеристик, вказує на технічну можливість створення на їх основі БпЛЕЗ. Застосування БпЛЕЗ для евакуації поранених (травмованих) може значно скоротити час проведення евакуації, а також мінімізувати ризики, що пов'язані з умовами місцевості та стану доріг.

З урахуванням досвіду російсько-української війни та евакуації поранених з поля бою можна визначити, що для забезпечення їх своєчасної та безпечної доставки до місця надання медичної допомоги БпЛЕЗ має відповідати таким орієнтовним вимогам:

вага корисного навантаження – 150–170 кг;

дальність польоту – не менше 40 км (радіус дії не менше 20 км);

швидкість польоту – 100–130 км/год;

висота польоту – 2–5 м (екранний ефект, додає 10–25% до підйомної сили);

тип аеродинамічної схеми – БпЛА МТ (eVTOL) без крила;

час польоту – 20–25 хв.

За аналізом відкритих джерел, існуючі та перспективні БпЛА МТ (eVTOL) при масі корисного навантаження – 150–170 кг мають вагові характеристики у такому діапазоні: маса АКБ – 90–120 кг, маса двигунів з гвинтами – 45–60 кг, маса рами, електронний регулятор швидкості (Electronic Speed Controller) та електроніки – 50–60

кг. Орієнтуючись на ці характеристики, максимальна злітна маса БПЛЕЗ має становити ~335–410 кг (середнє значення – ~373 кг).

Відомо, що максимальну злітну масу  $M_{зл}$ , можна визначити з співвідношення необхідної максимальної тяги  $T_{max}$  силової установки БПЛЕЗ до цільового коефіцієнту тягооснащеності  $K_T$  з якої відповідно можна вивести формулу для визначення максимальної тяги  $T_{max}$ .

$$M_{зл} = \frac{T_{max}}{K_T} \Rightarrow T_{max} = M_{зл} \cdot K_T$$

при цьому значення  $K_T$  слід встановити 2 (що відповідатиме ~40-60% від сумарної максимальної тяги силової установки БПЛА). Відтак, при максимальній злітній масі ~373 кг, максимальна

тяга силової установки БПЛЕЗ має становити 746 кг ( $373 \times 2 = 746$ ).

Орієнтуючись на модель електродвигуну MAD V118 IPE V2.0, максимальна сила тяги якого становить 48 кг, можна визначити, що для забезпечення сумарної сили тяги силової установки БПЛЕЗ на рівні 746 кг необхідно включити до її складу приблизно 16 електродвигунів зазначеного типу.

Враховуючи потребу в забезпеченні максимальної тяги силової установки БПЛЕЗ на рівні 746 кг, складемо порівняльну таблицю (табл. 6) варіантів аеродинамічних та компоновальних схем БПЛЕЗ за кількістю двигунів.

Таблиця 6

Порівняння варіантів аеродинамічних та компоновальних схем БПЛЕЗ по кількості двигунів

Кількість двигунів/ пропелерів, од	4/4	6/6	8/8	10/10	12/12	16/16
Тяга (макс.) на 1 двигун, кг	185–190	120–130	90–95	75–80	60–65	45–50
Робоча потужність 1 двигуна, кВт	18–22	14–16	8–10	6–8	5–6	3,5–4,5
Сумарна крейсерська потужність двигунів, кВт	60–65	60–65	55–60	55–60	55–60	55–60
Вага одного двигуна, кг	-	12–16	6–8	6–7	6–7	~4-5
Діаметр пропелера, дюйми (м)	80–90 (~2-3)	60–70	48–52	44–48 (1,2–1,32)	40–44 (1-1,12)	34–38
Крок пропелера, дюйми	25-30	26–32	22–28	18-24	18-22	20-28
Робочі оберти, RPM	~700	700-1000	900–1200	900–1200	900-1200	-
Потужність АКБ*, кВт/год	50-80	28-30	26–28	-	25-28	15-25
Ймовірна маса АКБ, кг	130-160	120-135	110-130	110-150	110-125	80-110
Орієнтовні габарити БПЛА, м	≥5,0×5,0	≥4,0×4,0	~3,0×3,0	~2,8×2,8	~2,6×2,6	~2,5×2,5
Надійність системи (стійкість до відмов)	незадовільна, відсутність резервування	низька, недостатня живучість	обмежена, баланс вартості та складності	хороша	висока, доступні двигуни, компактність, висока живучість	дуже висока, мінімальні габарити, максимальна безпека
Складність системи	низька	середня	середня	висока	висока	дуже висока
Можливість практичної реалізації	практично малоймовірно	ймовірно, але нерационально	реально, компроміс, габарити БПЛА на межі	реально, але складно	реально, найкращий варіант	висока вартість та складність

\*- з урахуванням часу польоту (20-25 хв) та резерву потужності (25-30%).

За даними з табл. 6 проведемо SWOT-аналіз ймовірної компоновальної схеми БПЛЕЗ з різною кількістю двигунів від 4 до 16 (табл. 7-12).

Таблиця 7

SWAT-аналіз 4-х двигунного БПЛЕЗ (quadcopter)

Strengths (Сильні сторони)	Weaknesses (Слабкі сторони)
найпростіша архітектура; мінімум ESC, проводки, керування; теоретично найнижча системна складність.	потрібна надекстремальна тяга (~185–190 кг на двигун), а також потребує використання редуктора або осового двигуну; пропелери 80–90" (небезпека та значні габарити); повна відсутність відмовостійкості; дуже високі пікові навантаження; обмежений вибір двигунів (eVTOL або гелікоптерний клас). Серійних БПЛА-двигунів майже не існує, лише експериментальні eVTOL або кастомні авіаційні рішення.

Opportunities (Можливості)	Threats (Загрози)
доцільна реалізація лише як дослідний стенд, експеримент з осовими двигунами, гібрид з редуктором.	катастрофа при відмові 1 двигуна; високий рівень вібрацій і шуму; сертифікація практично неможлива; величезний момент інерції та повільна реакція на керування; погана керованість біля землі.

4-х двигунна система є майже неможливою для реалізації із-за потреби в спеціалізованих двигунах, пропелерах великих розмірів, що становлять значну небезпеку, незадовільною динамікою польоту та складністю керування.

Таблиця 8

**SWAT-аналіз 6-ти двигунного БпЛЕЗ  
(hexacopter)**

Strengths (Сильні сторони)	Weaknesses (Слабкі сторони)
менше компонентів, ніж у 8–12-ти двигунних систем; простіша механіка, ніж у 12–16-ти двигунних системах; теоретично можливий для реалізації.	значна тяга на двигун (120–130 кг); пропелери 60–70" (небезпека та значні габарити); відмова 1 двигуна – втрата апарата; обмежений вибір серійних двигунів
Opportunities (Можливості)	Threats (Загрози)
можливий для реалізації у військових платформах або експериментальних eVTOL; використання надпотужних двигунів з запасом потужності.	низька живучість; високі навантаження на раму; перевищення шумових і вібраційних лімітів.

6-ти двигунна система має переважну більшість негативних характеристик 4-х двигунної системи та незначні переваги. Зазначений варіант є теоретично можливим, але має низьку раціональність реалізації.

Таблиця 9

**SWAT-аналіз 8-ми двигунного БпЛЕЗ  
(octocopter)**

Strengths (Сильні сторони)	Weaknesses (Слабкі сторони)
баланс між кількістю двигунів та складністю; доступні серійні heavy-lift двигуни; прийнятні габарити (~3×3 м); відпрацьована схема, що активно застосовується.	обмежена відмовостійкість; габарити на межі вимог; при відмові двигуна ймовірні критичні режими.
Opportunities (Можливості)	Threats (Загрози)
оптимізація маси та вартості; швидкий перехід від прототипу до зразку.	менший запас безпеки порівняно з 10-16 двигунними системами; складні алгоритми аварійної стабілізації.

8-ми двигунна система має значно кращі показники ефективності, аніж попередні системи, проте не позбавлена їх недоліків. Компромісне рішення між можливістю та доцільністю реалізації.

Таблиця 10

**SWAT-аналіз 10-ти двигунного БпЛЕЗ**

Strengths (Сильні сторони)	Weaknesses (Слабкі сторони)
краща відмовостійкість, ніж у 8-ми двигунній системі; менші пропелери, менші габарити; менші навантаження на кожен двигун; гарна керованість.	зростає складність реалізації (електрика, керування тощо); менше стандартних рамних рішень; більша вартість за 8-двигуну схему.
Opportunities (Можливості)	Threats (Загрози)
перехідна конфігурація між 8-ми і 12-ти двигунними системами; оптимальна для військових задач та логістики.	складність інтеграції; потреба в специфічній рамі.

10-ти двигуна система має кращі показники ніж 8-ми двигунна система, але підвищується складність реалізації та потреба в специфічних (нестандартних) рішеннях (рами, електрика тощо). Технічно сильніший, але менш стандартизований.

Таблиця 11

**SWAT-аналіз 12-ти двигунного БпЛЕЗ  
(dodecacopter)**

Strengths (Сильні сторони)	Weaknesses (Слабкі сторони)
найкраща відмовостійкість; використання реальних серійних двигунів (60–65 кг тяги); мінімальні габарити (~2,6×2,6 м); найнижчі показники пікових навантажень; кращі шанси на сертифікацію.	вища системна складність; більше ESC, проводки; вища вартість електроніки.
Opportunities (Можливості)	Threats (Загрози)
найкраща база для серійного виробництва автономних вантажних БпЛА та військових систем; легше масштабувати; дозволяє створювати БпЛА на основі шести променевих систем.	потреба в складному FOC-керуванні, якісній системі електронного управління (BMS) АКБ; помилки інтеграції можуть нівелювати технічними та експлуатаційними перевагами в використанні.

12-ти двигунна конфігурація є оптимальною. Баланс технічної складності та вартості. Висока ймовірність отримання бойових спроможностей для забезпечення виконання завдань критичної логістики та евакуації поранених в зоні ведення бойових дій. Доступне широке використання існуючих технічних рішень. Доцільно реалізувати у вигляді шестиосьової системи з двома двигунами на вісь.

Таблиця 12

**SWAT-аналіз 16-ти двигунного БпЛЕЗ**

Strengths (Сильні сторони)	Weaknesses (Слабкі сторони)
максимальна живучість; мінімальний розмір пропелерів; найменші локальні навантаження на двигуни та корпус; допускає відмову 2-х двигунів; найкраща архітектура для евакуаційних місій.	дуже висока складність; значна маса проводки; висока ціна; ймовірно надлишкова архітектура для логістичних місій
Opportunities (Можливості)	Threats (Загрози)
доцільне застосування в зоні ведення бойових дій, критична логістика, евакуація людей.	перевантаження систем керування; зниження ефективності через значні витрати на купівлю та утримання зразків.

16-ти двигуна конфігурація має найкращі показники з аеродинаміки, компактності (габаритні розміри  $\leq 2,5 \times 2,5$  м), доступності двигунів та пропелерів (34–38"), максимальної живучості та низької навантаженості обладнання. Проте має наступні недоліки:

значна системна складність “distributed propulsion system” (16 двигунів, 16 ESC, 16 каналів FOC, 16 джерел вібрацій, 16 точок відмови), яка збільшує вагу зразка без “користі” для виконання завдання (не дає корисного навантаження, не збільшує дальність, з’їдає запас АКБ);

більші електричні втрати (більше з’єднань, ESC, комутаційних втрат, складніший системі електронного управління АКБ);

потребує розробки складних алгоритмів перерозподілу тяги та управління роботою двигунів для реалізації потенціалу 16-ти двигунної схеми;

значна вартість БпЛА.

## Обговорення

Будь-який спосіб та засіб евакуації поранених (травмованих) з поля бою має ряд переваг, обмежень та перелік індивідуальних ризиків при їх застосуванні.

Застосування БПЛЕЗ для евакуації поранених (травмованих) з поля бою може забезпечити наступні переваги:

евакуація пораненого без застосування евакуаційної групи на більшості етапах її проведення;

висока швидкість евакуації в зоні можливої небезпеки (загрози безпосереднього впливу противника);

відсутність залежності БПЛЕЗ від умов місцевості (не потребує врахування наявності мінних полів на шляху евакуації, якості або наявності дорожнього покриття, ступінь його прохідності);

забезпечення умов евакуації при яких поранений (травмований) не зазнає значних змін фізіологічного стану (в наслідок руху осколків в тілі, зміщення полонаних кісток тощо), які виникають при використанні засобів наземних евакуаційних засобів;

забезпечення безпечної евакуації пораненого (травмованого) від впливу засобів противника завдяки швидкості, маневреності, непередбачуваності та скритності застосування БПЛЕЗ.

Недоліками застосування БПЛЕЗ для евакуації поранених (травмованих) з поля бою може бути:

необхідність в посадковому майданчику відповідного розміру;

низький рівень захисту безпосередньо БПЛЕЗ від впливу противника (осколкова або/та фугасна дія засобів ураження, кулі зі стрілецької зброї, БПЛА-перехоплювачів тощо);

потреба в високотехнологічному та вартісному зразку БПЛЕЗ.

З досвіду експлуатації БПЛА (eVTOL) та за результатами аналізу встановлено, що:

менша кількість двигунів призводить до експоненційного зростання вимог до одного двигуна і пропелера;

двигуни, що мають 120 кг тяги на ротор це зразки, що майже недоступні серійно (експериментальні зразки);

пропелери >60 дюймів роблять компактний БПЛА фізично неможливим, а також значний розмір пропелерів підвищує рівень небезпеки їх застосування;

сумарна потужність для 8–16-ти двигунів майже однакова (55–60 кВт), при цьому різниця не у ватах, а в керованості та безпеці. При 4–6 двигунах, “відмова” дорівнює “аварія”, при 8–16 двигунах допустима відмова 1–2 двигунів;

габарити БПЛА понад 4x4 м – є неприйнятними у зв'язку з вимогами компактності, помітності та експлуатаційної ефективності зразку БПЛЕЗ.

## Висновки

Викладені в статті матеріали свідчать про технічну можливість створення БПЛА для евакуації поранених (травмованих) з поля бою на основі існуючих та доступних технологій (технічних рішень), що активно впроваджуються у цивільному секторі.

Розглянуто базові технічні вимоги до можливого зразку БПЛЕЗ та його компоновальну схему за кількістю двигунів.

Встановлено, що для евакуації поранених (травмованих) вагою до 170 кг на 40 км (радіус дії до 20 км) БПЛА повинен мати мінімальні габарити, високу надійність та доступні компоненти, що найбільш ефективно можуть бути реалізовані в 12-ти двигунному компонованні.

Матеріали та пропозиції, що викладені в статті, можуть бути використанні при створенні орієнтовних тактико-технічних або загальних вимог до безпілотних літальних евакуаційних засобів.

Незважаючи на недоліки та переваги кожного окремого технічного засобу евакуації, наявність їх широкої номенклатури, включно з БПЛЕЗ, дозволить відповідним підрозділам своєчасно та безпечно проводити евакуаційні заходи залежно від ситуації та обмежень.

## Список використаних джерел

- [1.] K. Surman and D. Lockey, "Unmanned aerial vehicles and pre-hospital emergency medicine," *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, vol. 32, no. 9, 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13049-024-01180-7>
- [2.] S. Habibi, N. Ivaki, and J. Barata, "A Systematic Literature Review of Unmanned Aerial Vehicles for Healthcare and Emergency Services," arXiv preprint arXiv:2504.08834, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2504.08834>
- [3.] "GRIFF Aviation анонсує новий важкий дрон GRIFF 300," *Unmanned Systems Technology*, Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2016/12/griff-aviation-announces-new-griff-300-heavy-lifting-drone>
- [4.] "Офіційний сайт розробника EHang EH216-S," EHang. [Online]. Available: <https://www.ehang.com/ehang216s>
- [5.] "15 Best Powerful Drone Motors 2025 (6–100kg Thrust Range)," LIG Power, 2025. [Online]. Available: <https://www.ligpower.com/blog/powerful-drone-motors.html>
- [6.] "Що таке важкий дрон?," Grepow. [Online]. Available: <https://www.grepow.com/blog/what-is-a-heavy-lift-drone.html>
- [7.] "Топ-10 вантажних дронів 2025 року," Grepow. [Online]. Available: <https://www.grepow.com/blog/top-10-cargo-drones-of-2025.html>
- [8.] "Найважчі дрони на ринку: які БПЛА можуть перевозити найбільше?," Pilot Institute. [Online]. Available: <https://pilotinstitute.com/heaviest-drones/>
- [9.] "What Is an eVTOL Motor? A Complete Overview," LIG Power. [Online]. Available: <https://www.ligpower.com/blog/what-is-an-evtol-motor.html>
- [10.] N. Kitaev, "Створено новий електродвигун, здатний бути лідером у категорії 'питома потужність'," *SaveEnergy*, Jul. 30, 2025. [Online]. Available: <http://savenergy.info/page/created-new-electric-motor-capable-of-being-a-leader/>

- [11.] "Потужний двигун PMSM FLA8025," RoyPow. [Online]. Available: <https://www.roypow.com/ultradrive/high-power-pmsm-motor-fla8025-product/>
- [12.] "Резюме двигуна дрона БПЛА MAD V118 eVTOL," RC Drone. [Online]. Available: <https://rcdrone.top/uk/products/v118-evtol-uav-drone-motor-uk>
- [13.] "MAD V128L IPE V2.0 Дроновий двигун," RC Drone. [Online]. Available: <https://rcdrone.top/uk/products/v128l-vtol-drone-motor-uk>

<sup>1</sup>**Oleksandr Lutseviat**

<https://orcid.org/0009-0001-2435-5434>

<sup>2</sup>**Yaroslav Yaroshenko (PhD)**

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

<sup>2</sup>**Anatolii Tkachenko**

<https://orcid.org/0000-0001-7316-5437>

<sup>3</sup>**Kostiantyn Sadovyi (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)**

<https://orcid.org/0000-0003-2703-9696>

<sup>1</sup>*Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

## DEFINING TECHNICAL REQUIREMENTS FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR CASUALTY EVACUATION FROM THE BATTLEFIELD

*The significant personnel casualties within the Armed Forces of Ukraine and the vulnerability of ground evacuation means necessitate the search for non-standard technical solutions. The deployment of heavy unmanned aerial vehicles will significantly enhance the speed and safety of rescuing the wounded. The aim of this article is to determine the basic technical requirements and the estimated layout configuration of a multicopter-type unmanned aerial vehicle for battlefield casualty evacuation. The study employs general scientific research methods: analysis, synthesis, and a SWOT analysis of the characteristics of existing civilian electric vertical takeoff and landing (eVTOL) unmanned aerial vehicles with a payload capacity of approximately 200 kg. The paper establishes the core requirements for the unmanned aerial vehicle: a payload of 150–170 kg, an operational radius of up to 20 km, and a flight time of 20–25 minutes. Based on the results of the SWOT analysis, it is proven that a 12-engine configuration is optimal. This design ensures high fault tolerance, optimal dimensions (approximately 2.6x2.6 m), and enables the use of available serial components.*

*This article will be of practical value to military equipment developers, engineers, and representatives of medical units during the formulation of tactical and technical requirements for the latest aeromedical evacuation means.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, casualty evacuation, unmanned aerial vehicle power plant.*

### References

- [1.] K. Surman and D. Lockey, "Unmanned aerial vehicles and pre-hospital emergency medicine," *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, vol. 32, no. 9, 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13049-024-01180-7>
- [2.] S. Habibi, N. Ivaki, and J. Barata, "A Systematic Literature Review of Unmanned Aerial Vehicles for Healthcare and Emergency Services," arXiv preprint arXiv:2504.08834, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2504.08834>
- [3.] "GRIFF Aviation Announces the New GRIFF 300 Heavy-Lift Drone," *Unmanned Systems Technology*, Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2016/12/griff-aviation-announces-new-griff-300-heavy-lifting-drone>
- [4.] "Official Website of the EHang EH216-S Developer," EHang. [Online]. Available: <https://www.ehang.com/ehang216s>
- [5.] "15 Best Powerful Drone Motors 2025 (6–100kg Thrust Range)," LIG Power, 2025. [Online]. Available: <https://www.ligpower.com/blog/powerful-drone-motors.html>
- [6.] "What Is a Heavy-Lift Drone?," Grepow. [Online]. Available: <https://www.grepow.com/blog/what-is-a-heavy-lift-drone.html>
- [7.] "Top 10 Cargo Drones of 2025," Grepow. [Online]. Available: <https://www.grepow.com/blog/top-10-cargo-drones-of-2025.html>
- [8.] "Heaviest Drones on the Market: Which UAVs Can Carry the Most?," Pilot Institute. [Online]. Available: <https://pilotinstitute.com/heaviest-drones/>
- [9.] "What Is an eVTOL Motor? A Complete Overview," LIG Power. [Online]. Available: <https://www.ligpower.com/blog/what-is-an-evtol-motor.html>
- [10.] N. Kitaev, "A New Electric Motor Capable of Leading in the 'Power Density' Category Created," *SaveEnergy*, Jul. 30, 2025. [Online]. Available: <http://savenergy.info/page/created-new-electric-motor-capable-of-being-a-leader/>
- [11.] "High-Power PMSM Motor FLA8025," RoyPow. [Online]. Available: <https://www.roypow.com/ultradrive/high-power-pmsm-motor-fla8025-product/>
- [12.] "Overview of the MAD V118 eVTOL UAV Drone Motor," RC Drone. [Online]. Available: <https://rcdrone.top/uk/products/v118-evtol-uav-drone-motor-uk>
- [13.] "MAD V128L IPE V2.0 Drone Motor," RC Drone. [Online]. Available: <https://rcdrone.top/uk/products/v128l-vtol-drone-motor-uk>

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-155-161**

**УДК 004.94:519.876.2:355.4**

**Базіло Сергій Михайлович** (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-1597-3724>

**Міхін Олексій Олегович**

<https://orcid.org/0009-0001-9150-8840>

**Куцак Сергій Вікторович**

<https://orcid.org/0000-0001-5238-8957>

**Вапнічний В'ячеслав Анатолійович**

<https://orcid.org/0009-0002-6649-8764>

**Національний університет оборони України, Київ, Україна**

*Рукопис надійшов до редакції: 09.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 09.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **МЕТОД ПЕРМАНЕНТНОГО АНАЛІЗУ ВОЄННИХ ІГОР НА ОСНОВІ АДАПТИВНОГО ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАТЕРНІВ**

*У контексті трансформації сучасної війни, де кількісна перевага нівелюється технологічністю та швидкістю адаптації, перманентний аналіз воєнних ігор стає критичним інструментом випередження противника у когнітивному та операційному просторі, що підтверджує актуальність дослідження. Метою статті є розробка методу перманентного аналізу воєнних ігор, що базується на впровадженні адаптивного життєвого циклу та використанні динамічних патернів для забезпечення безперервного синтезу аналітичних даних у режимі реального часу. Основу дослідження складають методи системного аналізу, дослідження операцій, теорії управління та імітаційного моделювання. Були отримані наступні результати: розроблено структуру адаптивного життєвого циклу перманентного аналізу воєнних ігор, яка перетворює аналіз із завершального етапу воєнної гри на процес, що охоплює весь її життєвий цикл; розроблено алгоритмічне рішення для зіставлення фактичних результатів гри з базовою моделлю в реальному часі, що дозволяє автоматично фіксувати аномалії в діях гравців; запропоновано модель структурованого накопичення інформації, яка забезпечує аналітичну відтворюваність та цілісність результатів дослідження; Формалізовано систему динамічних патернів та зворотних зв'язків, яка дозволяє адаптувати аналітичну стратегію безпосередньо в ході гри при зміні оперативної обстановки. Запропонований авторами метод дозволяє підвищити аналітичну відтворюваність досліджень та забезпечити ефективне накопичення отриманого ігрового досвіду в базах знань. Результати дослідження можуть бути впроваджені у діяльність науково-дослідних установ та навчальних закладів для автоматизації обробки результатів різних типів воєнних ігор, а також під час подальших досліджень з питань аналітичного забезпечення воєнних ігор.*

**Ключові слова:** воєнна гра; аналітичне забезпечення; системний аналіз; життєвий цикл; патерн.

### **Вступ**

Аналітичний супровід є критичним компонентом сучасних воєнних ігор, оскільки саме він трансформує ігровий процес у перевірені стратегічні знання та рішення. Проте більшість підходів (особливо вітчизняних) розглядають аналіз як фінальний, ізольований етап воєнної гри (ВГ), що підтверджує досвід їх проведення в Національному університеті оборони України. Робота зосереджена на розробці інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень та алгоритмізації процесів аналітичного супроводу воєнних ігор.

Невирішеною частиною загальної проблеми є відсутність рекурсивних алгоритмів, які б дозволяли аналітичній системі коректуватися та забезпечувати перманентність висновків протягом усього життєвого циклу воєнної гри. На даний час відсутні формалізовані механізми, які б інтегрували аналіз у життєвий цикл ВГ як безперервний процес.

Цей факт, на авторську думку, зумовлює суб'єктивізм аналітиків. **Метою роботи** є обґрунтування концепції перманентності та розробка методу аналізу воєнних ігор на основі адаптивного життєвого циклу для забезпечення безперервного синтезу знань.

Актуальність дослідження полягає у необхідності переходу від лінійного до перманентного аналізу ВГ, як безперервної дослідницької функції, що супроводжує ВГ на всіх її етапах в реальному часі. Такий підхід дасть змогу забезпечити безперервний синтез знань та оперативно адаптувати траєкторію аналітичного супроводу ВГ до динамічних змін обстановки.

Формування методологічного базису для аналізу складних стохастичних систем, до яких належать сучасні воєнні ігри, пройшло шлях від описових експертних методів [1] до складних інформаційних систем обробки даних [2].

В [3] вказується на критичну проблему “інформаційного шуму” та суб’єктивізму, які неминуче виникають при ретроспективному оцінюванні, проте питання алгоритмізації та фільтрації цього “шуму” в реальному часі залишаються на рівні теоретичних дискусій.

У [4, 5] акцентується увага на тому, що ключова цінність ВГ полягає не стільки у фіксації перемоги чи поразки сторін, скільки у глибокому розумінні динаміки прийняття рішень людиною та виявленні прихованих факторів впливу. Проте, на авторський погляд, у цих підходах переважає лінійна логіка, де аналітична фаза є відокремленою від ігрового процесу.

В [6] етап інтелектуалізації тісно пов’язаний із впровадженням стандартів системної інженерії, таких як ISO/IEC/IEEE 15288, що дозволило науковцям структурувати аналіз не як поодинокі події, а як складову частину загального життєвого циклу системи. У цьому контексті у [7] пропонується ітераційні моделі управління, які, втім, мають переважно тривалі цикли зворотного зв’язку, не пристосовані до миттєвої корекції аналітичного фокусу при виникненні непередбачуваних ігрових патернів. У звітах SAS-139 [8] та SAS-153 [9] ініціативи забезпечують збереження контексту для майбутніх досліджень та сприяють накопиченню стратегічного досвіду, але фокусуються на використанні ігрових даних після проведення ВГ. У [10] представлені спроби інтеграції аналітики реального часу в ігрові середовища. Однак, як свідчить аналіз [11, 12], існуючим інформаційно-аналітичним рішенням бракує єдиної рекурсивної архітектури. Більшість систем аналізують фактичний стан об’єкта постфактум, не маючи інструментів для автоматизованого порівняння з еталонними динамічними патернами [13]. Відсутність такого порівняння в режимі реального часу унеможливає виявлення аномалій у момент їх виникнення, що критично знижує цінність аналізу в умовах високої динаміки сучасних ігрових сценаріїв.

Праці [14–16] розглядають інструменти накопичення організаційного досвіду. Проте в контексті ВГ цей процес зазвичай розірваний у часі, тобто висновки однієї гри потрапляють у базу знань значно пізніше, ніж починається наступна ітерація планування.

Таким чином, на основі проведеного авторами аналізу можна констатувати відсутність формалізованого методу, який би об’єднав математичний апарат адаптивного управління із безперервним життєвим циклом аналізу ВГ. Наявні підходи залишаються фрагментарними, що унеможливає досягнення повної перманентності аналітичного супроводу ВГ. На вирішення вказаної проблеми і спрямоване представлено авторами дослідження.

### Матеріали та методи

Представлені у статті дослідження належать до галузі інформаційних технологій, системного аналізу та моделювання складних систем. У ході дослідження застосовано низку наукових методів:

системний підхід дозволив розглядати воєнну гру як складну динамічну систему, а метод декомпозиції – виокремити елементарні аналітичні операції у вигляді функціональних блоків алгоритму [17];

метод математичного моделювання застосовано для формалізації відхилень ігрових даних від еталонної траєкторії [18]. Використання критерію середньоквадратичного відхилення дозволило перетворити якісні характеристики ігрового середовища у кількісний показник відхилення від еталонного патерна;

метод об’єктно-орієнтованого проектування використано при формуванні аналітичних патернів, що дозволило створити модель очікуваної поведінки системи для подальшого зіставлення з реальним ходом гри;

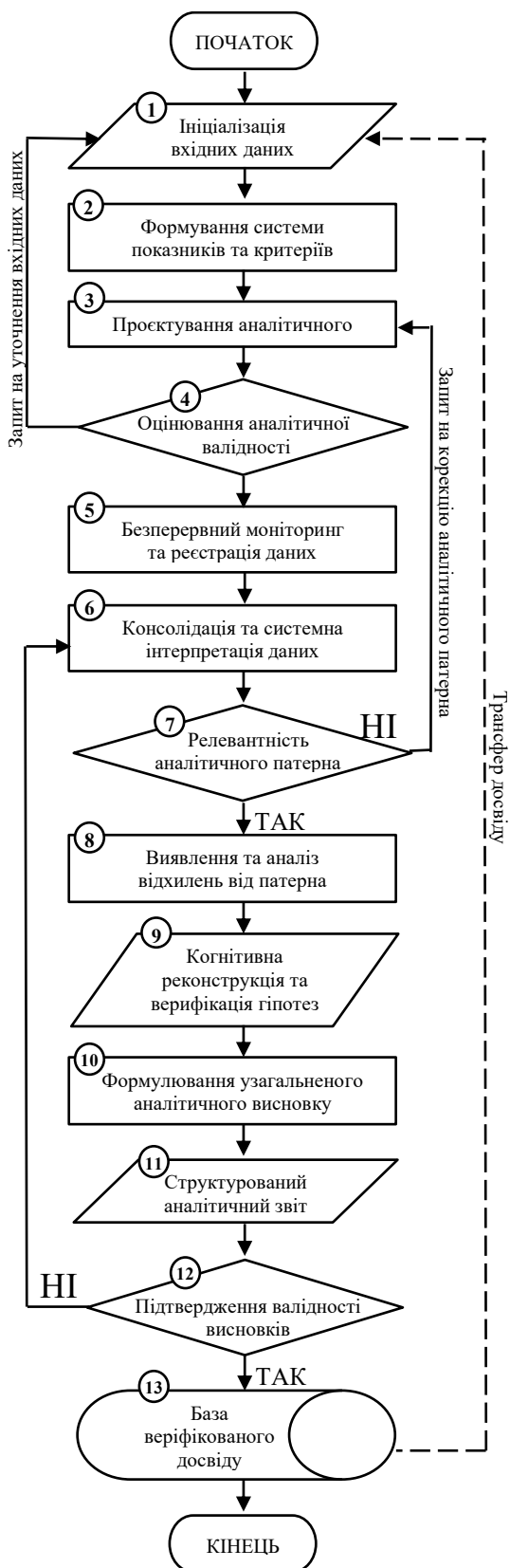
порівняльний аналіз застосовано для оцінювання ефективності розробленого методу відносно існуючих підходів.

### Результати

Практична реалізація розробленого методу здійснювалася на основі даних воєнної гри “Козацька фортеця – 2025”, що проходила в Національному університеті оборони України. У ході гри порівняно ефективність ідентифікації аномальних станів ігрового середовища дискретним методом та за допомогою запропонованого авторами універсального алгоритму життєвого циклу комплексного перманентного аналізу воєнної гри (рис 1).

Перша фаза алгоритму має назву “Проектування та ініціалізація” є концептуальним фундаментом алгоритму, її мета – трансформувати зовнішній запит (проблему замовника, вищого штабу, керівництва) у чітку аналітичну архітектуру, визначити мету, інструментарій оцінювання та сформулювати робочі гіпотези.

Перший блок алгоритму “Ініціалізація вхідних даних та робочих гіпотез” являє собою етап трансформації зовнішнього запиту у набір параметрів, необхідних для запуску аналітичного циклу з огляду на принципи системної інженерії [7]. Сюди надходить інформація щодо проблеми (запиту) замовника на проведення ВГ, яка задає вектор дослідження та визначає зміст аналітичної роботи. Також до блоку надходить інформація про типові помилки, ефективні рішення та статистичні закономірності попередніх ітерацій воєнних ігор та дані про можливості інструментів моніторингу і моделювання, виділених для проведення ВГ. В цьому блоці фіксуються проблема замовника, мета та цілі дослідження, дослідницькі питання, часові обмеження та ситуаційні рамки. На основі первинних даних члени аналітичної групи висувають припущення про можливі результати та причинно-наслідкові зв’язки, які будуть перевірятися в наступних блоках алгоритму. Зовнішні вимоги на проведення ВГ інтегруються з накопиченим досвідом аналітичної системи для формування доказової бази та робочих гіпотез дослідження.



**Рисунок 1** – Блок-схема універсального алгоритму життєвого циклу комплексного перманентного аналізу воєнної гри

Блок 2 має назву – “Формування системи показників та критеріїв ефективності”, в ньому визначається яким саме чином буде виміряне те, що потрібно дослідити, а саме конкретні ключові показники, за допомогою яких буде обчислено те

чи інше абстрактне поняття (стійкість, ефективність та ін.) та критерії до них. Тобто досягнення мети дослідження (М) можна представити, як функцію від вектору показників ( $P_i$ ),  $i=1 \dots n$ :

$$M = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (1)$$

При чому кожен показник  $P_i$  має бути релевантним, вимірювальним та чутливим до змін у сценарії гри та до появи ігрових ввідних.

Далі визначаються ключові показники ефективності, які оцінюють ступінь реалізації мети ВГ. У складній системі, такої як воєнна гра, це інтегральний показник ( $P_{заг}$ ), що формується через згортку декількох показників:

$$P_{заг} = \sum_{k=1}^m V_k \cdot E_k, \quad (2)$$

де  $V_k$  – коефіцієнт пріоритетності показника;  
 $E_k$  – нормалізований індикатор: від 0 до 1;  
 $m$  – кількість критеріїв, визначених для поточної мети.

В подальшому визначаються показники, що вимірюють продуктивність учасників гри, систем або підрозділів в межах ВГ. Вони повинні бути контрольованими, вимірювати кількісні параметри роботи та допомагати зрозуміти причини низької ефективності. В межах життєвого циклу перманентного аналізу ВГ вони розраховуються як відношення фактичного результату до нормативного стандарту:

$$P_{вик} = \frac{R_{факт}}{R_{норм}}, \quad (3)$$

де  $R_{факт}$  – фактичне значення, зафіксоване під час ходу учасника гри;  
 $R_{норм}$  – нормативне значення, як частина аналітичного патерна.

Якщо  $P_{вик} \geq 1$ , виконання відповідає або перевищує норматив, у випадку  $P_{вик} < 1$ , спостерігається пониження продуктивності.

Прикладами таких показників можуть бути: швидкість прийняття рішення, точність вогневого ураження, час розгортання в бойовий порядок та ін.

Отже у блоці 2 формується система метрик, яка гарантує, що аналіз буде базуватися не на суб’єктивних оцінках аналітиків, а на порівнюванні фактів із доктринальними очікуваннями.

Блок 3 “Проектування аналітичного патерна” відповідає за створення нормативної моделі сценарію. На цьому етапі створюється патерн того, як мають розвиватися ігрові події згідно з доктринами, настановами, планами, директивами. В подальшому представники аналітичної групи визначають як ключові показники можуть змінюватися у часі або залежно від ігрових подій, тобто визначаються допустимі межі відхилень, у межах яких дії гравців вважатимуться такими, що відповідають створеному патерну.

Аналітичний патерн ( $P_{\text{норм}}$ ) представимо як множину цільових функцій для кожного показника  $P$ :

$$P_{\text{норм}} = \{f_1(t, s), f_2(t, s), \dots, f_n(t, s)\} \quad (4)$$

де  $f_i$  – нормативна функція зміни  $i$ -го показника;  
 $t$  – ігровий час (динаміка);  
 $s$  – стан операційного середовища (контекст).

Для кожного показника встановлюється еталонне значення ( $E_e$ ), яке аналітики очікують побачити в ідеальній ситуації:

$$E_e = \int_{\text{поч}}^{\text{кін}} f_i(t, s) dt. \quad (5)$$

За результатами процедур в блоці 3 отримуємо модель аналітичного патерна, яка готова до перевірки на валідність у наступному блоці алгоритму.

Наступним кроком в алгоритмі є перевірка, чи здатна спроектована аналітична конструкція дати відповідь на запит (проблему) замовника. Для такої перевірки використовується блок 4 – “Оцінювання аналітичної валідності”. В ньому визначається чи дозволяє обраний набір показників верифікувати робочі гіпотези, чи існують засоби, здатні надати додаткові дані для наповнення аналітичної моделі та відсікаються помилкові архітектури аналізу ще до початку активної фази воєнної гри, що дає змогу економити ресурси.

$$V = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \{K\} \cap \{D\} \supseteq \{H\} \\ 0, \text{ в іншому випадку } \end{cases}, \quad (6)$$

де  $\{K\}$  – множина показників з блоку 2;  
 $\{D\}$  – доступні дані моніторингу;  
 $\{H\}$  – множина гіпотез, що потребують верифікації з блоку 1.

Якщо перетин множини показників та доступних даних задовольняє верифікації гіпотез, аналітична система вважається валідною ( $V = 1$ ).

Вихід “ТАК” свідчить про те, що архітектура аналітичного дослідження побудована коректно. Вихід “НІ” активує процедуру “Запит на уточнення вхідних даних”, тобто якщо бачимо, що не зможемо виміряти те, що спроектували, ми не йдемо далі. Алгоритм повертає нас у блоку 1, де уточнюється мета дослідження або змінюється набір робочих гіпотез або залучаються додаткові ресурси для моніторингу даних.

Друга фаза алгоритму “Моніторинг та обробка даних” описує перехід від теоретичного проектування до практичного збору даних у режимі реального часу ВГ. Завданням блоку 5 “Безперервний моніторинг та реєстрація даних” є фіксація кожного ігрового ходу (кроку), що дає змогу перетворити суб’єктивний досвід учасників гри у об’єктивний масив даних, придатний для подальшого аналізу. До блоку надходить інформація щодо переліку змінних, які необхідно

фіксувати для розрахунку ключових показників ефективності. В цьому блоці алгоритму: відбувається фіксація кожної ігрової дії в єдиній часовій шкалі; створюється масив необробленої інформації, що надходить від датчиків, симуляторів або членів аналітичної команди; формуються журнали подій, які унеможливають викривлення результатів аналізу.

З блоку 5 до блоку 6 надходить повний масив необроблених даних, який фіксує кожен крок дослідження (ВГ).

У блоці 6 відбувається перетворення масиву необроблених даних у структурований фактичний патерн, використовуючи методологію інтелектуального аналізу процесів [5]. На першому кроці цього блоку відбувається усунення часових розбіжностей між різними джерелами збору даних та видалення непотрібної інформації. Одиночні ігрові події об’єднуються у логічні групи і проходять процес перетворення фізичних чи технічних параметрів ігрових подій на мову аналітичних показників, які були визначені в блоці 2. З цього блоку фактичний аналітичний патерн, в якому кожен крок дослідження вже має оцінку надходить на вхід блоку 7.

В даному блоці фактичний хід подій порівнюється із закладеними в блоці 3 очікуваннями, щоб визначити, чи залишається обрана аналітична модель актуальною. Серед функцій блоку можна виділити наступні: виявлення ситуацій, коли реальні події кардинально виходять за межі сценарію; перевірка, чи не стала базова модель застарілою через динамічну зміну ігрових обставин; ініціація перегляду патерна через зворотний зв’язок. Вихід з блоку “ТАК” свідчить про те, що ігрові події розвиваються в межах допустимих логічних рамок патерна, в цьому випадку система переходить до блоку 8. Вихід “НІ” активує “Запит на корекцію аналітичного патерна. Тобто, якщо порівнюється ігрова реальність із неактуальною моделлю, отримуються хибні висновки. Алгоритм повертає процес у блок 3, де базова модель оновлюється з урахуванням нових реалій, після чого аналіз продовжується. Математичний критерій релевантності аналітичного патерна має вигляд:

$$G = \begin{cases} 1, Z_{\text{факт}} \in W_{\text{норм}} \\ 0, Z_{\text{факт}} \notin W_{\text{норм}} \end{cases}, \quad (7)$$

де  $G$  – релевантність аналітичного патерна;  
 $Z_{\text{факт}}$  – фактичний стан системи;  
 $W_{\text{норм}}$  – допустима область значень стану системи.

Патерн вважається релевантним ( $G = 1$ ), якщо фактичний стан системи  $Z_{\text{факт}}$  належить до допустимої області значень  $W$ , визначеної у патерні.

Цей блок універсального алгоритму запобігає аналізу ігрових подій через призму застарілих або неадекватних моделей. Механізм адаптивної корекції забезпечує синхронізацію аналітичного

патерна з оперативною (ігровою) обстановкою [18]. Далі відбувається перехід до третьої фази універсального алгоритму – “Диференційний аналіз та синтез”, в якій з’ясовуються причинно-наслідкові зв’язки та формуються доказова база майбутніх аналітичних висновків.

В блоці 8 визначається відмінності між тим, що було заплановано, і тим, що було зафіксовано під час ВГ [13]. Обчислюється різниця між значеннями ключових показників ефективності еталонного та фактичного аналітичних патернів. Виявлені відхилення класифікуються на позитивні (успіх перевищив очікування), негативні (зниження ефективності) та аномальні (непередбачені результати). Далі аналітики відслідковують момент в ігровому часі, коли фактична траєкторія почала розходитися з еталонною.

Для кожного показника, визначеного у блоці 2, розраховується функція відхилення:

$$C_k(t) = P_{\text{факт}}(k, t) - P_{\text{норм}}(k, t), \quad (8)$$

де  $P_{\text{норм}}$  – еталонна базова модель;

$P_{\text{факт}}$  – верифікований ігровий (аналітичний) патерн.

Загальне системне відхилення визначається:

$$Q_{\text{сис}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Pi})^2}, \quad (9)$$

де  $Q_{Pi}$  – допустиме відхилення  $i$ -го показника.

За результатами процедур в блоці 8 ігрові аналітики зосереджуються саме на тих ігрових моментах, де система поведилася не так, як очікувалося, тобто виявляють критичні точки успіху або невдачі досліджуваної системи.

Наступним блоком алгоритму є блок 9, в якому відбувається перевірка початкових гіпотез, висунутих у блоці 1. Члени аналітичної команди відтворюють логіку прийняття рішень учасниками на основі зафіксованих кроків, щоб зрозуміти мотивацію та умови кожної дії, підтверджують або спростовують робочі гіпотези, висунуті на початку життєвого циклу перманентного аналізу та встановлюють залежності між показниками виконання та досягнутим результатом. Через механізм верифікації гіпотез на базі фактичних відхилень забезпечується трансформація операційних даних у аналітичні висновки, що мінімізує вплив суб’єктивного фактору на фінальні результати аналізу.

На наступному етапі, в блоці 10 відбувається перехід від окремих фрагментів ВГ до формування цілісної картини. Тут цифри та підтвержені гіпотези з блоку 9 перетворюються на відповіді для замовника. Ігрові гіпотези об’єднуються у комплексний аналітичний висновок. Відбувається пошук повторюваних помилок або факторів успіху, які не були очевидні на етапі окремих гіпотез. Саме в цьому блоці аналітики розуміють чи досягнута

мета дослідження (воєнної гри) і яка відповідь на головне питання замовника.

Запропонований авторами життєвий цикл комплексного перманентного аналізу воєнної гри завершується створенням структурованого аналітичного звіту (блок 11), який має бути зрозумілим для особи, що приймає рішення і містити стислу відповідь на головну проблему замовника, графіки відхилень від патерна та статистичні підтвердження гіпотез, перелік виявлених проблемних питань, висновків та рекомендації. При цьому звіт не є просто папером. Це має бути інформаційний пакет, який передається замовнику та одночасно слугує входом для останньої, найважливішої фази алгоритму – “Контур валідності та бази досвіду”.

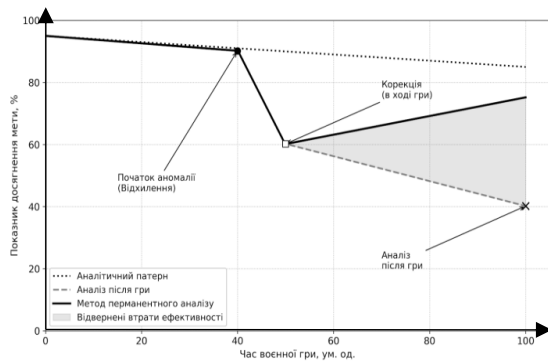
В блоці 12 алгоритм виконує “фінальну перевірку на міцність”. Якщо звіт виглядає сумнівним, дані з цього блоку повертаються на переробку в блок 6. Якщо висновки реалістичні, алгоритм переходить до своєї 4 фази (Імплементация та трансфер досвіду), вони записуються до бази верифікованого досвіду (блок 13) та передаються для використання в майбутніх воєнних іграх [14-16].

## Обговорення

На відміну від класичних методик де аналітична фаза ВГ є ізольованим фінальним етапом, запропонований авторами метод інтегрує аналіз безпосередньо в ігровий процес. Перевагою розробленого методу є впровадження рекурсивних алгоритмів корекції (блоки 7 та 12), що дозволяє аналітичній системі самостійно адаптуватися до непередбачуваних ігрових патернів у режимі реального часу. Якщо фактичний стан системи виходить за межі допустимої області значень еталонного патерна, алгоритм ініціює запит на його корекцію (блок 7), що забезпечує актуальність висновків при різкій зміні оперативної (ігрової) обстановки.

Апробація запропонованого авторами методу під час ВГ “Козацька фортеця – 2025” підтвердила її переваги над методом аналізу воєнної гри після її завершення. На рис. 2 наведено порівняльну динаміку показника досягнення мети ВГ при використанні післяігрового аналізу та розробленого методу перманентного аналізу. Як видно з графіка, своєчасна ініціалізація блоку 7 дає змогу сформувати зону відвернених втрат ефективності, що є прямим наслідком скорочення періоду реакції на ігрове відхилення.

Запропонований метод, на думку авторів, вирішує проблему розірваності процесу накопичення ігрового досвіду. Завдяки контуру валідності висновки потрапляють до бази знань безпосередньо в ході гри, а не після тривалого періоду підготовки паперових звітів.



**Рисунок 2** – Порівняльна динаміка показника досягнення мети при застосуванні різних методів аналізу воєнної гри

Слід зауважити, що ефективність методу суттєво залежить від якості початкової ініціалізації вхідних даних та точності формування системи показників. Подальші дослідження доцільно спрямувати на автоматизацію процесу формування функцій зміни показників із залученням методів штучного інтелекту для прогнозування складних стохастичних сценаріїв воєнних ігор.

### Висновки

Практична значущість отриманих результатів підтверджується успішною їх апробацією в ході ВГ “Козацька фортеця – 2025”, де використання запропонованого алгоритму дало змогу скоротити період виявлення ігрових невідповідностей на 35–40 відсотків. Застосування інтегрального показника невідповідності замість суб’єктивного спостереження забезпечило автоматизацію моніторингу об’єктивних даних контролю, що дало змогу аналітичній системі ідентифікувати аномалії в режимі реального часу. Це забезпечило зростання обсягу знань, який на середині ігрового циклу перевищив 50 відсотків, створюючи умови для оперативного коригування планів безпосередньо в ході гри.

### Список використаних джерел

[1.] J. Curry and T. Price, *The Matrix Games Handbook: Better Decisions through Communication and Argumentation*. Raleigh, NC, USA: Lulu Press, 2021.

[2.] P. Sabin, *Simulating War: Studying Conflict through Simulation Games*. London, U.K.: Bloomsbury Academic, 2014.

[3.] E. M. Bartels, *Building Better Games: Why Game Design Matters for Strategic Wargaming*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2020, <https://doi.org/10.7249/RR4285-1>.

[4.] M. B. Caffrey, *On Wargaming: A Public Service*. Newport, RI, USA: Naval War College Press, 2019.

[5.] W. van der Aalst, *Process Mining: Data Science in Action*. Berlin, Germany: Springer, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4>.

[6.] *Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes*, ISO/IEC/IEEE Std 15288:2023, 2023.

[7.] B. S. Blanchard and W. J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2011.

[8.] NATO Science and Technology Organization, *Curated Wargaming Databases (SAS-139): Final Report STO-TR-SAS-139*. Brussels, Belgium: NATO STO, 2021.

[9.] NATO Science and Technology Organization, *Wargaming Exploitation and Analysis (SAS-153): Technical Activity Report*. Brussels, Belgium: NATO STO, 2023.

[10.] J. Purdue and K. McCown, "Integrating real-time analytics into wargaming environments," *Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2022, <https://doi.org/10.1177/15485129211054321>.

[11.] A. W. Reddie et al., "Next-generation wargaming for the 21st century," *Science*, vol. 362, no. 6421, pp. 1362–1364, 2018, <https://doi.org/10.1126/science.aav8648>.

[12.] Ю. С. Яковлев, "Методологія інтелектуалізації інформаційно-аналітичних систем спеціального призначення," *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, № 2, с. 45–56, 2021, <https://doi.org/10.32620/reks.2021.2.04>.

[13.] J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson, and D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.

[14.] N. J. Milton and P. Lambe, *The Knowledge Manager's Handbook: A Step-by-Step Guide to Implementing Knowledge Management in Your Organization*. London, U.K.: Kogan Page, 2020.

[15.] T. H. Davenport and D. D. D'Augelli, *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. Boston, MA, USA: Harvard Business School Press, 1998.

[16.] R. O. Weber and D. W. Aha, "Intelligent lessons learned systems," *Expert Systems with Applications*, vol. 24, no. 1, pp. 17–34, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00133-9](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00133-9).

[17.] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, and H. A. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin, Germany: Springer, 2018, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4>.

[18.] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive Control*. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2008.

Serhii Bazilo (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-1597-3724>

Oleksii Mikhin

<https://orcid.org/0009-0001-9150-8840>

Serhii Kutsak

<https://orcid.org/0000-0001-5238-8957>

Viacheslav Vapnichnyi

<https://orcid.org/0009-0002-6649-8764>

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## A METHOD FOR PERMANENT WARGAME ANALYSIS BASED ON AN ADAPTIVE LIFE CYCLE AND DYNAMIC PATTERNS

*In the context of the transformation of modern warfare, where quantitative superiority is offset by technological advancement and the speed of adaptation, permanent wargame analysis becomes a critical tool for outpacing the adversary in the cognitive and operational domains, which confirms the relevance of the study. The aim of the article is to develop a method for permanent wargame analysis based on the implementation of an adaptive life cycle and the use of dynamic patterns to ensure the continuous synthesis of analytical data in real time. The study is based on the methods of systems analysis, operations research, control theory, and simulation modeling. The following results were obtained: an adaptive life cycle framework for permanent wargame analysis was developed, which transforms the analysis from the final stage of a wargame into a process spanning its entire life cycle; an algorithmic solution was developed for comparing the actual game results with the baseline model in real time, allowing for the automatic detection of anomalies in players' actions; a model for structured information accumulation was proposed, ensuring the analytical reproducibility and integrity of the research results; a system of dynamic patterns and feedback loops was formalized, allowing the analytical strategy to be adapted directly during the game in response to changes in the operational environment. The method proposed by the authors improves the analytical reproducibility of research and ensures the effective accumulation of the acquired gaming experience in knowledge bases. The research results can be implemented in the activities of research institutions and educational establishments to automate the processing of results for various types of wargames, as well as in further research on the analytical support of wargaming.*

**Keywords:** wargame; analytical support; systems analysis; life cycle; pattern.

### References

- [1.] J. Curry and T. Price, *The Matrix Games Handbook: Better Decisions through Communication and Argumentation*. Raleigh, NC, USA: Lulu Press, 2021.
- [2.] P. Sabin, *Simulating War: Studying Conflict through Simulation Games*. London, U.K.: Bloomsbury Academic, 2014.
- [3.] E. M. Bartels, *Building Better Games: Why Game Design Matters for Strategic Wargaming*. Santa Monica, CA, USA: RAND Corporation, 2020, <https://doi.org/10.7249/RAA285-1>.
- [4.] M. B. Caffrey, *On Wargaming: A Public Service*. Newport, RI, USA: Naval War College Press, 2019.
- [5.] W. van der Aalst, *Process Mining: Data Science in Action*. Berlin, Germany: Springer, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4>.
- [6.] *Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes, ISO/IEC/IEEE Std 15288:2023*, 2023.
- [7.] B. S. Blanchard and W. J. Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2011.
- [8.] NATO Science and Technology Organization, *Curated Wargaming Databases (SAS-139): Final Report STO-TR-SAS-139*. Brussels, Belgium: NATO STO, 2021.
- [9.] NATO Science and Technology Organization, *Wargaming Exploitation and Analysis (SAS-153): Technical Activity Report*. Brussels, Belgium: NATO STO, 2023.
- [10.] J. Purdue and K. McCown, "Integrating real-time analytics into wargaming environments," *Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2022, <https://doi.org/10.1177/15485129211054321>.
- [11.] A. W. Reddie et al., "Next-generation wargaming for the 21st century," *Science*, vol. 362, no. 6421, pp. 1362–1364, 2018, <https://doi.org/10.1126/science.aav8648>.
- [12.] Yu. S. Yakovliev, "Methodology of intellectualization of information and analytical systems for special purposes," *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, no. 2, pp. 45–56, 2021, <https://doi.org/10.32620/reks.2021.2.04>. (in Ukrainian)
- [13.] J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson, and D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.
- [14.] N. J. Milton and P. Lambe, *The Knowledge Manager's Handbook: A Step-by-Step Guide to Implementing Knowledge Management in Your Organization*. London, U.K.: Kogan Page, 2020.
- [15.] T. H. Davenport and D. D. D'Augelli, *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. Boston, MA, USA: Harvard Business School Press, 1998.
- [16.] R. O. Weber and D. W. Aha, "Intelligent lessons learned systems," *Expert Systems with Applications*, vol. 24, no. 1, pp. 17–34, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00133-9](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00133-9).
- [17.] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, and H. A. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin, Germany: Springer, 2018, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4>.
- [18.] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive Control*. Mineola, NY, USA: Dover Publications, 2008.

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-162-173

УДК 629.7.015:539.4

Царенко Андрій Олександрович

<https://orcid.org/0000-0002-4810-8382>

Самохліб Олександр Олександрович

<https://orcid.org/0009-0005-5240-1759>

Тягній Володимир Григорович (кандидат технічних наук, старший науковий співробітник)

<https://orcid.org/0000-0002-5151-9801>

Олійник Людмила Леонідівна (кандидат економічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-8706-1329>

*Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 15.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## МІЦНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЯК ОСНОВА ЇХНЬОЇ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*На теперішній час безпечна експлуатація повітряних суден потребує всебічного аналізу чинників, що визначають міцність конструкцій повітряних суден і формують основу їхньої безпечної експлуатації в умовах багатокомпонентних навантажень.*

*У статті з метою формування концепції аналізу міцності конструкцій повітряних суден здійснено узагальнення методів аналітичного й числового розрахунку та досліджено механізми ініціювання й розвитку втомних тріщин у металевих і композитних елементах корпусу, проаналізовано роль структурних неоднорідностей, залишкових напружень після зварювання чи клепаання, а також впливу вологості, температури й циклічних перевантажень. Розроблено методику прогнозування ресурсу за критерієм накопичення пошкоджень, що враховує як макроскопічні параметри навантаження, так і мікроструктурні особливості матеріалу. Наведено результати експериментальних випробувань, які підтверджують достовірність моделі й дозволяють визначити залишковий ресурс конструкцій при різних сценаріях експлуатації. Розглянуто фізико-механічні та технологічні параметри, що впливають на напружено-деформований стан основних елементів планера, як то обшивки, лонжеронів, стрингерів, вузлів кріплення, шпангоутів та інших силових елементів, які сприймають динамічні, втомні, термічні й аеродинамічні впливи. Обґрунтовано використання технологій лазерного зміцнення, термомеханічної обробки та локального поверхневого гарту для збільшення опору втомним руйнуванням. Особливе місце приділено питанням неруйнівного контролю й структурного моніторингу в режимі реального часу. Проаналізовано ефективність ультразвукових, акустико-емісійних, рентгенографічних та інфрачервоних методів діагностики, спрямованих на виявлення прихованих дефектів і мікротріщин без демонтажу елементів.*

*Матеріали статті можуть бути корисними для фахівців-практиків, викладачів і здобувачів освіти, які займаються та вивчають питання удосконалення функціонування систем експлуатації і ремонту (відновлення) повітряних суден з метою підтримання їх у постійній готовності до використання за призначенням.*

**Ключові слова:** міцність конструкцій, повітряне судно, втома матеріалу, граничні стани, композити, неруйнівний контроль, безпека польотів.

### Вступ

Зростання вимог до безпеки експлуатації повітряних суден у цивільній та державній авіації, а також розвиток нових конструкційних рішень із використанням легких сплавів і композитів зумовлюють посилення наукової уваги до питань міцності, довговічності та структурної надійності авіаційних конструкцій [1-3]. Підвищення енергетичних навантажень, розширення діапазону робочих температур, збільшення тривалості польотів і циклів зльоту-посадки створюють умови, за яких класичні підходи до розрахунку міцності потребують уточнення з урахуванням динамічних і втомних ефектів [4-6]. Одним із найбільш

актуальних напрямів забезпечення надійності експлуатації літальних апаратів та аероплатформ є розвиток методів прогнозування залишкового ресурсу та систем моніторингу технічного стану [7-9]. У цьому контексті математичне моделювання напружено-деформованих станів, вивчення механізмів втомного руйнування та інтеграція результатів діагностики у цифрові двійники конструкцій виступають основою для формування нової парадигми проектування і контролю авіаційної техніки.

### Матеріали та методи

У галузі міцності та довговічності конструкцій повітряних суден свідчить про зростання інтересу

до інтеграції експериментальних, аналітичних і числових методів для підвищення точності оцінки напружено-деформованого стану елементів планера [4-9]. Значна частина робіт зосереджена на створенні узагальнених моделей втомного руйнування, що враховують реальні режими навантажень під час зльоту, крейсерського польоту й посадки, а також зміну властивостей матеріалів унаслідок багаторазових циклів навантаження [10-12]. У сучасних підходах особлива увага приділяється врахуванню залишкових зварювальних і технологічних напружень, які суттєво впливають на формування мікротріщин, накопичення пошкоджень і втрату стійкості вузлів конструкції [13-15]. В останні роки активно розвивається напрям застосування методів скінченно-елементного аналізу та цифрових двійників конструкцій для відтворення реальних умов експлуатації повітряних суден, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг процесів деформації та оцінювати ризики виникнення руйнувань [16-18]. Особливу увагу приділено математичним моделям деградації матеріалів, які враховують вплив корозії, температурних градієнтів і вібраційних навантажень. Водночас наявні результати досліджень, хоч і демонструють високий рівень теоретичного опрацювання окремих аспектів, часто залишаються локальними [10-15].

Таким чином, метою роботи є обґрунтування та побудова цілісної концепції аналізу міцності конструкцій повітряних суден, яка базується на поєднанні класичних теоретичних положень із сучасними методами математичного моделювання, комп'ютерної симуляції та експериментального контролю. Особливу увагу приділено адаптації результатів математичного аналізу до цифрових технологій технічного обслуговування, як то систем моніторингу технічного стану конструкцій у режимі реального часу (Structural Health Monitoring, SHM) та стратегій технічного обслуговування на основі фактичного стану об'єкта (Condition-Based Maintenance, CBM), які дозволяють переходити від планових перевірок до обслуговування за станом.

### Результати

В основі дослідження лежить визначення теоретичних основ забезпечення міцності конструкцій повітряних суден, що відповідають за показники надійності, довговічності і безпеки у реальних умовах експлуатації.

Основні галузі застосування теоретичних принципів та математичних моделей міцності охоплюють наступні категорії [1-3, 15]:

1. Цивільне авіабудування, що включає у себе оптимізацію силових схем і структур планера з метою досягнення мінімальної маси при забезпеченні необхідних запасів міцності, жорсткості та довговічності.

2. Військове авіабудування, що включає у себе підвищення стійкості конструкцій до ударних, вібраційних і вибухових навантажень, а також

забезпечення збереження працездатності після часткових бойових пошкоджень.

3. Безпілотні літальні апарати (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), що включає у себе розрахунок і моделювання міцності легких корпусних і несучих систем, чутливих до флатеру, турбулентності й аеродинамічних пульсацій.

4. Вертолітна техніка та конвертоплани, що включає у себе дослідження впливу циклічних навантажень, спричинених роботою гвинтових систем, і методів підвищення ресурсу лопатей та редукторів.

5. Космічна та гіперзвукова авіація, що включає у себе аналіз термомеханічних напружень при надвисоких швидкостях, перепадах температур і аеродинамічних ударах у верхніх шарах атмосфери.

6. Ремонт, модернізація та подовження ресурсу авіаційної техніки, що включає у себе оцінку на числовому рівні залишкової міцності, виявлення прихованих дефектів і розроблення технологій відновлення пошкоджених елементів.

7. Спеціалізовані транспортні та рятувальні апарати, що включає у себе забезпечення стабільності конструкцій під час польотів у турбулентних або нестандартних умовах, включаючи посадку на обмежених майданчиках.

8. Наземна випробувальна та діагностична інфраструктура авіаційних систем, що включає у себе застосування теоретичних принципів міцності для калібрування стендів, побудови моделей навантаження та перевірки відповідності конструкцій міжнародним стандартам безпеки.

Наведені напрями демонструють міждисциплінарний характер задач забезпечення міцності конструкцій повітряних суден, що поєднують теоретичне моделювання, матеріалознавство, системну інженерію та експериментальні методи контролю, створюючи основу для подальшого аналізу видів навантажень і критеріїв надійності авіаційних систем. На рис. 1 представлено узагальнену структурну схему галузей застосування принципів і моделей міцності авіаційних конструкцій, яка відображає системну взаємодію між теоретичними основами проектування, експлуатаційними технологіями та діагностичними процедурами. Діаграма демонструє, що поняття міцності охоплює не лише розрахунково-конструкційні аспекти, але й питання надійності, довговічності, відновлення та контролю стану елементів повітряних суден у різних класах авіаційної техніки.

Подальший етап дослідження ґрунтується на узагальненні теоретичних принципів забезпечення міцності та надійності конструкцій повітряних суден, а також на формалізації базових залежностей, що описують взаємозв'язок між напруженням, деформацією та зовнішніми навантаженнями. Математичний апарат аналізу міцності базується на визначенні напружено-деформованого стану елементів конструкції під дією комплексних механічних і термодинамічних впливів. У загальному випадку рівняння рівноваги

матеріальної точки конструкції може бути записане як  $\nabla \cdot \sigma + f = 0$ , де множник  $\sigma$  є тензором напружень, а  $f$  – вектор об'ємних сил. Залежність між напруженнями  $\sigma_{ij}$  і деформаціями  $\varepsilon_{ij}$  описується узагальненим законом Гука

$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$ , де  $C_{ijkl}$  – тензор пружних модулів, який для ізотропного матеріалу спрощується до двох параметрів: модуля Юнга  $E$  та коефіцієнта Пуассона  $\nu$ .



**Рисунок 1** – Структурна схема галузей застосування принципів і моделей міцності авіаційних конструкцій

Визначення напружень у критичних зонах конструкцій здійснюється з урахуванням граничних умов, геометрії елемента та типу навантаження [16-18]. Отримані рівняння формують основу для подальшого числового розв'язання задач у середовищах скінченно-елементного аналізу, що дає змогу враховувати просторову неоднорідність матеріалу, наявність отворів, ребер жорсткості, зварних і клейових з'єднань. Таким чином, математичне моделювання забезпечує можливість кількісної оцінки

напружено-деформованого стану та визначення граничних умов, за яких відбувається втрата працездатності елементів.

З позицій теорії міцності подальший аналіз пов'язаний із класифікацією 3 метою узагальнення основні види навантажень і характерні параметри їх дії наведено у табл. 1. Це дозволяє сформулювати початкові умови для подальших розрахунків граничних станів і визначення коефіцієнтів запасу міцності, які є ключовими показниками експлуатаційної надійності повітряних суден.

Таблиця 1

## Основні види навантажень, що діють на конструкції повітряних суден [4, 11]

Навантаження	Характер впливу	Джерела виникнення	Параметри впливу
Статичне	постійне або квазістале навантаження, що діє у стабільному режимі	вага конструкції, тиск палива, сила тяги, аеростатичні сили	постійні напруження $\sigma = \text{const}$ , малий градієнт деформацій
Динамічне	змінне навантаження викликає коливальні процеси	турбулентність, пориви вітру, зліт та посадка, робота двигунів	змінні напруження $\sigma(t)$ , резонансні коливання, флатер
Втомне	цикли навантаження спричиняє накопичення пошкоджень	циклічні навантаження під час польоту, вібрації, термічні коливання	кількість циклів $n$ , амплітуда $\delta\sigma$ , границя витривалості $\sigma_{-1}$
Термічне	температурні градієнти, що змінюють пружні властивості матеріалів	нагрівання при терті, випромінювання, робота двигуна, опір атмосфери	теплове розширення $\alpha$ від коливань $\Delta T$ , напруження $E \cdot \alpha \cdot \Delta T$

*Аналіз втомного руйнування та довговічності конструкцій*

Втомне руйнування матеріалів є однією з основних причин втрати працездатності елементів планера, двигунів і несучих систем повітряних суден, оскільки воно має прихований, кумулятивний характер і часто не супроводжується зовнішніми ознаками пошкодження до моменту виникнення критичних тріщин.

Втомне руйнування є багатостадійним процесом, який включає зародження дефекту, його стабільний ріст та досягнення критичного стану, коли залишкова несуча здатність матеріалу стає недостатньою для сприйняття навантаження [11, 12]:

1. На першій стадії формуються локальні мікродефекти, що ініціюються в місцях концентрації напружень (біля поверхневих нерівностей, включень, пор або зварних швів). У металах цей етап пов'язаний із циклічною дислокаційною активністю та утворенням сітки ковзання, у результаті чого виникають мікропорожнини та зони розупорядкування кристалічної решітки. У композитних матеріалах зародження дефектів часто має інший характер, це розшарування матриці, мікротріщини у волокнах або відшарування на межі волокон–матриця, спричинене різницею у модулях пружності компонентів. Важливо, що навіть незначні циклічні напруження, які не перевищують межі текучості, можуть ініціювати ці процеси через накопичення локальних пластичних деформацій.

2. На другій стадії розвивається стабільний ріст тріщини, який описується емпіричною залежністю Паріса–Ердогана  $da/dN = C(\Delta K)^m$  де  $da/dN$  – швидкість росту тріщини за один цикл навантаження,  $\Delta K$  – діапазон коефіцієнта інтенсивності напружень, а  $C$  і  $m$  – експериментально визначені матеріальні константи. Для металів характерне поступове збільшення  $\Delta K$  із ростом тріщини, тоді як у композитах поведінка може бути нелінійною через анізотропію та шарувату структуру. У волокнистих

композитах ріст тріщини супроводжується послідовним руйнуванням волокон, зсувом між шарами та накопиченням енергії в матриці, що ускладнює точний опис кінетики процесу.

3. Третя стадія – це досягнення критичного розміру тріщини  $a_c$ , за якого виконуються умови нестійкого росту та руйнування конструкції. Для її оцінки застосовують критерій лінійної механіки руйнування  $K_I = K_{IC}$ , де  $K_I$  – поточне значення коефіцієнта інтенсивності напружень, а  $K_{IC}$  – критичне значення. У композитних структурах критерієм може виступати питома енергія розшарування  $G_C$ , яка визначає межу стабільності адгезійних зв'язків між шарами. Важливо зазначити, що швидкість розвитку тріщини залежить не лише від амплітуди навантаження, а й від частоти циклів, температури, вологості та наявності корозійних процесів.

На рис. 2 наведено узагальнену схему послідовності розвитку втомного руйнування конструкційних матеріалів повітряних суден, що включає три основні стадії.

Схема може бути використана як базова модель при побудові розрахункових методів прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій.

Прогнозування залишкового ресурсу та оцінка пошкоджуваності поєднують методи аналітичного моделювання, експериментального контролю та статистичної обробки даних, що дозволяє передбачити момент досягнення критичного стану елемента й своєчасно вжити заходів з технічного обслуговування або заміни. Метою прогнозування є не лише визначення кількості циклів до руйнування, а й оцінка швидкості деградації матеріалу за умов змінних навантажень, температурних градієнтів і корозійного середовища. У сучасній практиці розрізняють три основні підходи до прогнозування ресурсу, як то аналітичний, експериментально-емпіричний і цифровий аналітичний, що включає у себе моделювання на основі вхідного набору даних [4, 7, 16]:



**Рисунок 2** – Схема послідовності стадій розвитку втомного руйнування матеріалів авіаційних конструкцій

Прогнозування залишкового ресурсу та оцінка пошкоджуваності поєднують методи аналітичного моделювання, експериментального контролю та статистичної обробки даних, що дозволяє передбачити момент досягнення критичного стану елемента й своєчасно вжити заходів з технічного обслуговування або заміни. Метою прогнозування є не лише визначення кількості циклів до руйнування, а й оцінка швидкості деградації матеріалу за умов змінних навантажень, температурних градієнтів і корозійного середовища. У сучасній практиці розрізняють три основні підходи до прогнозування ресурсу, як то аналітичний, експериментально-емпіричний і цифровий аналітичний, що включає у себе моделювання на основі вхідного набору даних [4, 7, 16]:

1. Аналітичні моделі ґрунтуються на законах механіки руйнування і кінетиці втомного пошкодження. Вони дозволяють кількісно описати залежність між напруженням, амплітудою циклу та швидкістю росту тріщини. Найбільш поширеними є моделі типу Мінера (лінійна гіпотеза накопичення пошкоджень) та Паріса–Ердогана, які встановлюють зв'язок між кількістю циклів  $N_i$  зміною коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$ .

2. Експериментально-емпіричні методи передбачають лабораторні випробування зразків або елементів конструкції під циклічним навантаженням із подальшим узагальненням

результатів у вигляді залежностей типу S–N (напруження–кількість циклів). Ці методи забезпечують високу точність у межах конкретного матеріалу, але вимагають тривалих експериментів і значних ресурсів.

3. Цифрові аналітичні підходи базуються на використанні методів машинного навчання (Machine Learning, ML) та систем моніторингу технічного стану, які дозволяють прогнозувати деградацію за часовими рядами сенсорних вимірювань. Такі моделі інтегруються у цифрові двійники конструкцій і постійно оновлюють оцінку залишкового ресурсу в режимі реального часу.

Аналітичні та емпіричні підходи залишаються основою інженерних розрахунків, проте їхня точність значно підвищується завдяки інтеграції з цифровими технологіями діагностики. Такий підхід дозволяє не лише підвищити точність оцінки пошкоджуваності, а й перейти від регламентних перевірок до адаптивного управління технічним станом повітряних суден, що забезпечує зниження експлуатаційних витрат і підвищення рівня безпеки польотів (табл. 2).

Основні напрями та методичні підходи експериментального визначення втомних характеристик конструкцій повітряних суден можна систематизувати таким чином [19-22]:

Методи прогнозування втомного ресурсу авіаційних конструкцій [4, 7, 16]

Метод	Основний принцип	Переваги	Обмеження і недоліки
<b>Аналітичний</b>	розрахунок на основі механіки руйнування, закон Паріса	оцінка закономірності, мінімізація даних експ. дослідження	не враховує випадковий характер навантажень та неоднорідність матеріалу
<b>Експеримент. емпіричний</b>	побудова кривих S–N та $\epsilon$ –N за результатами втомних випробувань	висока точність для конкретного матеріалу або вузла конструкції	довготривале і дороге дослідження, складне масштабування
<b>Цифровий аналітичний</b>	набір сенсорних даних, алгоритми машинного навчання та побудова цифрових двійників	постійне оновлення оцінки наявного ресурсу, адаптація до умов експлуатації	великий обсяг вх. даних, складні алгоритми їхньої обробки, високий рівень ресурсомісткості

1. Лабораторні випробування на зразках матеріалів виконуються на спеціалізованих машинах багатоциклового навантаження, які імітують реальні режими напруження. Результати подаються у вигляді залежностей типу S–N (навантаження–кількість циклів) або  $\epsilon$ –N (деформація–кількість циклів). Цей підхід дозволяє визначити межу витривалості, кількість циклів до руйнування та вплив різних факторів – температури, вологості, амплітуди навантажень – на поведінку матеріалу.

2. Стендові випробування елементів і вузлів конструкції використовуються для оцінки міцності зварних, клепанних і клейових з'єднань, лонжеронів, обшивки та вузлів кріплення. Стенди забезпечують багатоканальне навантаження, яке моделює складну комбінацію силових, аеродинамічних і термічних впливів. Під час випробувань застосовуються датчики тензометрії, системи акустико-емісійного контролю та високошвидкісна відеореєстрація для моніторингу процесу утворення тріщин.

3. Моделювання втомних процесів у цифрових середовищах виконується на основі методу скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) та використання експериментальних даних для калібрування моделей. Це дозволяє прогнозувати розподіл напружень, визначати критичні зони зародження тріщин і порівнювати отримані результати з натурними випробуваннями. Поєднання експерименту й моделювання забезпечує високий рівень достовірності прогнозів довговічності конструкції.

4. Методи неруйнівного контролю під час втомних випробувань. До них належать ультразвукова дефектоскопія, акустико-емісійний аналіз, рентгенографічна томографія та інфрачервона термографія. Ці технології дозволяють у режимі реального часу спостерігати розвиток мікротріщин, локальні зміни структури матеріалу та втрату зчеплення в композитних шарах без порушення цілісності зразка.

Отримані результати експериментальних досліджень становлять основу для створення довідкових баз даних втомних характеристик

матеріалів, що використовуються у процесі сертифікації конструкцій.

*Оцінка сучасних матеріалів та технологій підвищення міцності*

Підвищення міцності конструкцій авіаційної техніки досягається не лише шляхом оптимізації геометрії або вдосконалення розрахункових методів, а насамперед завдяки використанню новітніх матеріалів і технологій обробки, які дозволяють забезпечити високу питому жорсткість, корозійну стійкість і стабільність експлуатаційних характеристик у широкому діапазоні умов. Зростання швидкостей польоту, збільшення навантажень на елементи планера, а також потреба в зменшенні маси конструкції стимулюють перехід від традиційних алюмінієвих сплавів до композиційних, гібридних і наноструктурованих матеріалів, здатних зберігати механічну цілісність при тривалих циклах навантаження. Одночасно з розвитком матеріалознавства відбувається активне вдосконалення технологічних методів підвищення міцності, як то термомеханічної, лазерної, іонно-променевої та поверхневої обробки, які формують у матеріалі залишкові напруження стиску та знижують імовірність ініціації тріщин. Важливе місце займають і методи неруйнівного контролю, що дозволяють на ранніх етапах виробництва або експлуатації виявляти дефекти, мікротріщини та неоднорідності без пошкодження зразка.

Перехід від традиційних алюмінієвих і титанових сплавів до полімерних, металевих і керамічних композитів зумовлений необхідністю досягнення високого рівня енергоефективності та експлуатаційної надійності авіаційної техніки. Композити характеризуються поєднанням легкості матриці та міцності армуючих елементів (волокон або наноструктур), що забезпечує їхню унікальну структурно-механічну адаптивність. Гібридні матеріали, у свою чергу, поєднують властивості декількох типів структур, як то металевих і полімерних шарів або волокон різної природи, що дозволяє отримати синергетичний ефект у вигляді підвищення опору втомі, тріщиноутворенню й термічним деформаціям. Для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей під час проектування конструкцій використовується

широкий набір композиційних матеріалів, які демонструють різне співвідношення міцності, жорсткості та маси [1, 2, 10]. У табл. 3 наведено та узагальнено порівняльні характеристики основних класів матеріалів, що використовуються у сучасному авіабудуванні, із зазначенням їхніх основних переваг, недоліків, ризиків використання та типових сфер застосування.

Використання таких матеріалів дозволяє суттєво зменшити масу літального апарата без втрати жорсткості, знизити експлуатаційні витрати та підвищити паливну ефективність, мінімізувати локальні концентрації напружень і підвищити стійкість до втомного руйнування.

Таблиця 3

**Порівняльні характеристики основних типів композиційних і гібридних матеріалів для авіаційних конструкцій [1, 2, 10]**

Матеріал	Складові	Переваги	Обмеження	Застосування
<b>Вуглецеві композити</b>	епоксидна матриця та вугл. волокна	висока питома міцність, мала маса, термостійкість	висока вартість, складність ремонту	обшивка фюзеляжів, крила, рулі висоти, лопаті турбін
<b>Арамідні композити</b>	полімерна матриця та арам. волокна	ударостійкість, гнучкість, стійкість до втоми	чутливість до вологи, низька жорсткість	обшивка кабін, внутрішні елементи корпусу, бронепанелі
<b>Скловолоконні композити</b>	поліестерна чи епоксидна матриця та скловолокно	низька вартість, добрі діелектричні властивості, технологічність	низький рівень термостійкості, схильність до старіння	елементи керма, обтічники, панелі внутрішньої обшивки
<b>Металеві матричні композити</b>	алюмінієва чи титанова матриця та керамічні волокна	висока жорсткість та теплостійкість, можливість роботи при температурах від $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	дуже високі показники густини, складність обробки	вузли двигунів, елементи системи кріплення, теплонавантажені панелі
<b>Гібридні композити</b>	комбінація волокон різної природи	баланс між жорсткістю і ударостійкістю, довговічність	неоднорідність властивостей, складність при переробці	вузли крил літака, стабілізатори, хвостові опори, елементи шасі
<b>Наноструктур. композити</b>	полімерна або металева матриця та нанотрубки	високі показники зносостійкості, електропровідність, стійкість до радіації	складність виробництва, недостатня стандартизація	функціональні покриття, сенсори, тонкостінні елементи конструкцій

Підвищення міцності та довговічності авіаційних матеріалів неможливе без цілеспрямованого вдосконалення їхніх мікроструктурних властивостей за допомогою технологічних методів зміцнення. Ці методи спрямовані на формування у матеріалі залишкових стискальних напружень, зменшення концентрації дефектів, стабілізацію структури зерен і покращення опору втомному та корозійному руйнуванню. Кожен із цих методів має власні механізми впливу на матеріал, що дозволяє досягати оптимального балансу між твердістю, пластичністю й опором тріщиноутворенню [13-15]:

1. Термообробка (гартування, відпуск, старіння) забезпечує рівномірну зміну фазового складу матеріалу та контроль розміру зерна, що підвищує межу текучості й стабільність структури. В авіаційних сплавах термічні цикли часто використовуються для формування

дрібнозернистої або мартенситної структури, яка забезпечує високу міцність без суттєвої втрати в'язкості.

2. Лазерна обробка дає змогу локально модифікувати поверхневий шар із високою точністю, утворюючи тонку термозміцнену зону з мінімальними залишковими напруженнями. За рахунок контрольованого теплового впливу підвищується мікротвердість, зносостійкість і втомна міцність без зміни геометрії деталі.

3. Поверхнєве зміцнення (іонне азотування, карбонізація, кульове обкатування) використовується для створення градієнтної структури твердості, що значно підвищує опір поверхневому спрацюванню й корозійній втомі.

У табл. 4 наведено порівняльні характеристики основних технологічних методів зміцнення, які застосовуються для авіаційних сплавів і

композитних матеріалів [13-15].

Таблиця 4

Технологічні методи зміцнення матеріалів авіаційних конструкцій [13-15]

Метод	Механізм дії	Переваги	Обмеження	Застосування
<b>Термообробка</b>	перетворення фаз, оцінка зернистості, експлуатація при залишкових стиск. напружень	стабільність властивостей, покращення міцності та пластичності	потребує точного контролю температури та часу, можливе перегартування	алюмінієві та титанові сплави, складові елементи планера, кріпильні деталі
<b>Лазерна обробка</b>	локал. нагрівання і подальше швидке охолодження, зміцнення поверхн. шару	висока точність, мінімальні деформації, підвищення мікротвердості	обмежена глибина впливу в межах 0,2-1 мм, висока вартість обладнання	турбінні лопаті, вали, шестерні, крайки крила літального апарату
<b>Іонне азотування та плазмове насичення</b>	метод дифузійного насичення азотом або вуглецем поверхні	підвищення твердості, зносо- та корозо стійкості	може знижувати пластичність, вакуумне середовище	вузли двигунів, опорні елементи, шасі літального апарату
<b>Кульове обкатування</b>	механічне наклепування поверхні кульками під тиском	формування стискальних напружень, ріст опору втомі	обмеження по товщині деталі, нерівномірність обробки	поверхні фюзеляжу, обшивка, кріпильні зони
<b>Ультразвукове зміцнення</b>	високочастотні удари по поверхні з мікропластичною деформацією	зменшення залишкових напружень, довговічність	обмежена продуктивність, складність автоматизації	зварні шви, високонапружені ділянки корпусу літака
<b>Комбіновані методи</b>	поєднання теплової, механічної та дифузійної дії	підвищення міцності, твердості, зносостійкості	складність технологічного контролю, спец. обладнання	критичні елементи двигунів, несучі конструкції, вузли посадки

Неруйнівний контроль (Nondestructive testing, NDT)) є невід'ємною складовою системи забезпечення міцності, надійності та безпечності авіаційних конструкцій. Його мета полягає у виявленні дефектів, як то тріщин, пор, розшарувань, корозійних зон та структурних неоднорідностей, без порушення цілісності матеріалу. Методи NDT широко застосовуються на всіх етапах життєвого циклу повітряного судна: від контролю вихідних заготовок і процесів зварювання чи склеювання до діагностики під час експлуатації та ремонту.

Основні технології неруйнівного контролю, що використовуються в авіаційній промисловості включають у себе наступні категорії [8, 20, 22]:

- ультразвукова дефектоскопія (Ultrasonic Testing, UT) для виявлення внутрішніх тріщин, розшарувань і пор за допомогою аналізу відбитих ультразвукових хвиль; забезпечує високу точність визначення глибини та розмірів дефектів.

- рентгенографічний аналіз (Radiographic Testing, RT) для візуалізації внутрішньої структури деталей, ефективна для виявлення порожнин, тріщин і включень у зварних або литих елементах.

- вихрострумний контроль (Eddy Current Testing, ECT), що використовується для виявлення

поверхневих і підповерхневих дефектів у провідних матеріалах; чутливий до мікротріщин та зон корозії.

- інфрачервона термографія (Infrared Thermography, IRT) для діагностики композитних конструкцій і клейових з'єднань шляхом аналізу теплових полів і виявлення зон із порушеною теплопровідністю.

- акустико-емісійний контроль (Acoustic Emission Testing, AET) для моніторингу процесів зародження та розвитку тріщин у реальному часі за допомогою аналізу акустичних імпульсів, що виникають у матеріалі.

- оптична інтерферометрія та цифрова кореляція зображень (Digital Image Correlation, DIC) для вимірювання деформацій поверхні з високою просторовою роздільністю; застосовується для аналізу напружених станів у тонких елементах.

- магнітопорошковий метод (Magnetic Particle Testing, MT) з метою контролю феромагнітних матеріалів шляхом візуалізації ліній витоку магнітного поля у місцях тріщин або неоднорідностей.

- лазерна віброметрія (Laser Vibrometry, LV) для безконтактного визначення коливальних

характеристик деталей і локалізація дефектів через зміну частотного спектра.

Інтеграція цих технологій із системами цифрового аналізу даних, штучним інтелектом та машинним навчанням дозволяє створювати інтелектуальні комплекси діагностики, здатні автоматично розпізнавати тип і критичність дефектів. Такий підхід забезпечує перехід від регламентного контролю до концепції прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance, PM).

### Обговорення

Сучасна багаторівнева концепція забезпечення безпеки польотів ґрунтується на переході від періодичного технічного контролю до безперервного моніторингу стану авіаційних конструкцій у реальному часі, що дає змогу планувати обслуговування з урахуванням фактичного стану елементів. Замість регламентних перевірок, що базуються на середньостатистичних ресурсах, сучасні технології орієнтовані на індивідуалізоване управління життєвим циклом конструкції [16], де основну роль відіграють дані сенсорного моніторингу, цифрове моделювання та аналітичні алгоритми машинного навчання:

1. Системи SHM інтегруються у структуру планера, крил і двигунів та забезпечують безперервне спостереження за параметрами напружено-деформованого стану, вібраційними характеристиками та появою локальних пошкоджень у реальних умовах експлуатації [3, 16, 17].

2. Стратегія CBM використовує дані з SHM-систем для побудови моделей ризику і прогнозування моменту досягнення критичних меж працездатності [7, 8, 16].

Результати аналітичного та експериментального аналізу міцності, отримані на попередніх етапах, інтегруються у систему управління льотною безпекою, створюючи єдиний замкнутий контур “контроль – прогноз – рішення – дія”. Як показано на рис. 3, ядром цієї системи є комплексний моніторинг даних, який об’єднує сенсорні підсистеми різної фізичної природи, як то датчики деформацій, вібраційні сенсори, термомари, оптико-волоконні елементи та акустико-емісійні системи. Наступний рівень системи включає комплексну оцінку стану об’єкта, аналіз трендів деградації, а також модулі машинного навчання, що реалізують функції прогнозування та побудови цифрового двійника.



Рисунок 3 – Інтегрована схема управління технічним станом авіаційних конструкцій на основі даних моніторингу

Цифровий двійник, у свою чергу, використовується для моделювання потенційних сценаріїв навантаження, оцінки залишкового ресурсу та адаптивного управління технічним станом конструкцій у реальному часі. Постійне уточнення прогнозних моделей відбувається у процесі зворотного зв'язку з експлуатаційними даними, що забезпечує адитивне оновлення моделей прогнозування. Завершальним етапом є інтеграція результатів у систему безпечної експлуатації, у якій реалізується керування льотною безпекою. У такий спосіб формується динамічна система прийняття рішень, що поєднує обчислювальні, діагностичні та управлінські модулі.

### Висновки

Дослідження було присвячено комплексному аналізу міцності конструкцій повітряних суден як ключової передумови їхньої безпечної експлуатації. Основна увага зосереджена на встановленні закономірностей у представленні в рамках математичної моделі напружено деформованого стану елементів планера, визначенні механізмів втомного руйнування матеріалів, оцінці довговічності конструкцій і створенні інтегрованих методів прогнозування залишкового ресурсу, що включало у себе виконання наступних етапів:

- проведено систематизацію видів навантажень (статичних, динамічних, втомних, термічних) та розроблено класифікацію їхнього впливу на елементи конструкцій;
- формалізовано математичні моделі граничних станів, що враховують стохастичний характер навантажень і структурну неоднорідність матеріалів;
- досліджено кінетику зародження та розвитку втомних тріщин у металевих і композитних матеріалах, визначено ключові параметри деградації;
- узагальнено методи прогнозування ресурсу (аналітичні, експериментально-емпіричні та цифрові аналітичні);
- проведено порівняльний аналіз сучасних композиційних і гібридних матеріалів, які забезпечують зниження маси конструкцій при зростанні їхньої жорсткості та стійкості до втоми;
- обґрунтовано застосування технологій термічної, лазерної та поверхневої обробки для підвищення опору руйнуванню й зносостійкості;
- досліджено ефективність неруйнівних методів контролю для моніторингу стану елементів без демонтажу;
- розроблено концепцію інтегрованої системи управління технічним станом конструкцій, що поєднує сенсорні мережі, аналітичні моделі та алгоритми адаптивного управління у контурі “контроль – прогноз – рішення – дія”.

Значимість отриманих результатів полягає у формуванні науково-технічних засад для переходу від регламентного до прогнозного технічного обслуговування. Реалізація запропонованої концепції забезпечує підвищення достовірності

оцінки залишкового ресурсу, зниження ймовірності відмов конструкцій у польоті, оптимізацію витрат на ремонт та подовження життєвого циклу повітряних суден. Таким чином, розроблені підходи мають практичне значення для систем управління льотною безпекою, модернізації авіаційної техніки й створення нових поколінь інтелектуальних систем моніторингу.

### Список використаних джерел

- [1.] B. Parveez, M. I. Kittur, I. A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, and M. A. Umarfarooq, "Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: A review," *Polymers*, vol. 14, no. 22, p. 5007, 2022, <https://doi.org/10.3390/polym14225007>.
- [2.] R. Phiri, S. M. Rangappa, S. Siengchin, O. P. Oladijo, and T. Ozbakkaloglu, "Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39661, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661>.
- [3.] V. Cusati, S. Corcione, and V. Memmolo, "Potential benefit of structural health monitoring system on civil jet aircraft," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7316, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22197316>.
- [4.] L. Molent and B. Dixon, "Airframe metal fatigue revisited," *International Journal of Fatigue*, vol. 131, p. 105323, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105323>.
- [5.] Y. A. Kedir and H. G. Lemu, "Prediction of fatigue crack initiation under variable amplitude loading: Literature review," *Metals*, vol. 13, no. 3, p. 487, 2023, <https://doi.org/10.3390/met13030487>.
- [6.] J. Palmer, J. Jones, M. Whittaker, and S. Williams, "Thermo-mechanical fatigue crack growth and phase angle effects in Ti6246," *Materials*, vol. 15, no. 18, p. 6264, 2022, <https://doi.org/10.3390/ma15186264>.
- [7.] D. Gerhardinger, A. Domitrović, K. Krajček Nikolić, and D. Ivančević, "Predicting the remaining useful life of light aircraft structural parts: An expert system approach," *Aerospace*, vol. 10, no. 11, p. 967, 2023, <https://doi.org/10.3390/aerospace10110967>.
- [8.] S. Fu, Y. Chen, H. Zhou, and Z. Ma, "Prognostic and health management of critical aircraft systems and components: An overview," *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8124, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23198124>.
- [9.] S. Deng and J. Zhou, "Prediction of remaining useful life of aero-engines based on CNN-LSTM-attention," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 17, p. 232, 2024, <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00639-w>.
- [10.] R. Healey, J. Wang, W. K. Chiu, N. M. Chowdhury, A. Baker, and C. Wallbrink, "A review on aircraft spectra simplification techniques for composite structures," *Composites Part C: Open Access*, vol. 5, p. 100131, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100131>.
- [11.] C. Wallbrink, J. M. Hughes, and A. Kotousov, "Experimental investigation of crack opening loads in an aircraft load spectrum," *International Journal of Fatigue*, vol. 171, p. 107560, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107560>.
- [12.] M. F. Yaren and A. O. Ayhan, "A new method for prediction of fatigue crack propagation life under variable amplitude spectrum loading," *Theoretical and Applied*

- Fracture Mechanics, vol. 131, p. 104355, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104355>.
- [13.] A. Chiocca, F. Frendo, and L. Bertini, "Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components," *Procedia Structural Integrity*, vol. 38, pp. 447–456, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.045>.
- [14.] Y. Guo and P. Li, "Effect of residual stress and microstructure on the fatigue crack growth behavior of aluminum friction stir welded joints," *Materials*, vol. 17, no. 2, p. 385, 2024, <https://doi.org/10.3390/ma17020385>.
- [15.] F. Chen, H. Zhang, Z. Li, Y. Luo, X. Xiao, and Y. Liu, "Residual stresses effects on fatigue crack growth behavior of rib-to-deck double-sided welded joints in orthotropic steel decks," *Advances in Structural Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 35–50, 2024, <https://doi.org/10.1177/13694332231213462>.
- [16.] J. W. Y. Chia, W. J. C. Verhagen, J. M. Silva, and I. Cole, "A review and outlook of airframe digital twins for structural prognostics and health management in the aviation industry," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 77, pp. 398–417, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612524002267>
- [17.] X. Lai, L. Yang, X. He, Y. Pang, X. Song, and W. Sun, "Digital twin-based structural health monitoring by combining measurement and computational data: An aircraft wing example," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 69, pp. 76–90, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.06.006>.
- [18.] L. Pinello, O. Hassan, M. Giglio, and C. Sbarufatti, "Preliminary nose landing gear digital twin for damage detection," *Aerospace*, vol. 11, no. 3, p. 222, 2024, <https://doi.org/10.3390/aerospace11030222>.
- [19.] P. R. Costa, D. Montalvão, M. Freitas, R. Baxter, and L. Reis, "Review of multiaxial testing for very high cycle fatigue: From 'conventional' to ultrasonic machines," *Machines*, vol. 8, no. 2, p. 25, 2020, <https://doi.org/10.3390/machines8020025>.
- [20.] F. Grotto, C. Bouvet, B. Castanié, and J. Serra, "Testing structural elements under multiaxial loading: A numerical model of the bench to understand and predict complex boundary conditions," *Aerospace*, vol. 11, no. 1, p. 68, 2024, <https://doi.org/10.3390/aerospace11010068>.
- [21.] P. C. Ilie and A. Ince, "Three-dimensional fatigue crack growth simulation and fatigue life assessment based on finite element analysis," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 45, no. 11, pp. 3251–3266, 2022, <https://doi.org/10.1111/ffe.13815>.
- [22.] N. Ghadarah and D. Ayre, "A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6945, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23156945>

**Andrii Tsarenko**

<https://orcid.org/0000-0002-4810-8382>

**Oleksandr Samokhlib**

<https://orcid.org/0009-0005-5240-1759>

**Volodymyr Tiahnii** (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher)

<https://orcid.org/0000-0002-5151-9801>

**Liudmyla Oliinyk** (Candidate of Economic Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-8706-1329>

**Kremenchuk Flight College Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine**

## STRENGTH OF AIRCRAFT STRUCTURES AS THE BASIS FOR THEIR SAFE OPERATION

*Currently, the safe operation of aircraft requires a comprehensive analysis of the factors that determine the structural strength of aircraft and form the basis for their safe operation under multi-component loads.*

*In this article, with the aim of developing a concept for analyzing the strength of aircraft structures, methods of analytical and numerical calculation are summarized, and the mechanisms of initiation and propagation of fatigue cracks in metal and composite fuselage components are investigated; the role of structural inhomogeneities, residual stresses after welding or riveting, as well as the effects of humidity, temperature, and cyclic overloads. A methodology for predicting service life based on the damage accumulation criterion has been developed, which takes into account both macroscopic load parameters and microstructural features of the material. The results of experimental tests are presented, which confirm the validity of the model and allow for the determination of the residual service life of structures under various operational scenarios.*

*The study examines the physical, mechanical, and technological parameters that influence the stress-strain state of the airframe's main structural elements, such as the skin, spars, stringers, fastening assemblies, bulkheads, and other load-bearing components that are subjected to dynamic, fatigue, thermal, and aerodynamic loads. The use of laser hardening, thermomechanical treatment, and localized surface hardening technologies to increase resistance to fatigue failure is justified. Special attention is given to issues of non-destructive testing and real-time structural monitoring. The effectiveness of ultrasonic, acoustic emission, radiographic, and infrared diagnostic methods aimed at detecting hidden defects and microcracks without dismantling components is analyzed.*

The materials in this article may be useful for practicing specialists, instructors, and students who are engaged in or studying issues related to improving the operation of aircraft maintenance and repair (restoration) systems with the aim of keeping them in constant readiness for their intended use.

**Keywords:** structural strength, aircraft, material fatigue, limit states, composites, nondestructive testing, flight safety.

## References

- [1.] B. Parveez, M. I. Kittur, I. A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, and M. A. Umarfarooq, "Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: A review," *Polymers*, vol. 14, no. 22, p. 5007, 2022, <https://doi.org/10.3390/polym14225007>.
- [2.] R. Phiri, S. M. Rangappa, S. Siengchin, O. P. Oladijo, and T. Ozbakkaloglu, "Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39661, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661>.
- [3.] V. Cusati, S. Corcione, and V. Memmolo, "Potential benefit of structural health monitoring system on civil jet aircraft," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7316, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22197316>.
- [4.] L. Molent and B. Dixon, "Airframe metal fatigue revisited," *International Journal of Fatigue*, vol. 131, p. 105323, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105323>.
- [5.] Y. A. Kedir and H. G. Lemu, "Prediction of fatigue crack initiation under variable amplitude loading: Literature review," *Metals*, vol. 13, no. 3, p. 487, 2023, <https://doi.org/10.3390/met13030487>.
- [6.] J. Palmer, J. Jones, M. Whittaker, and S. Williams, "Thermo-mechanical fatigue crack growth and phase angle effects in Ti6246," *Materials*, vol. 15, no. 18, p. 6264, 2022, <https://doi.org/10.3390/ma15186264>.
- [7.] D. Gerhardinger, A. Domitrović, K. Krajčec Nikolić, and D. Ivančević, "Predicting the remaining useful life of light aircraft structural parts: An expert system approach," *Aerospace*, vol. 10, no. 11, p. 967, 2023, <https://doi.org/10.3390/aerospace10110967>.
- [8.] S. Fu, Y. Chen, H. Zhou, and Z. Ma, "Prognostic and health management of critical aircraft systems and components: An overview," *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8124, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23198124>.
- [9.] S. Deng and J. Zhou, "Prediction of remaining useful life of aero-engines based on CNN-LSTM-attention," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 17, p. 232, 2024, <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00639-w>.
- [10.] R. Healey, J. Wang, W. K. Chiu, N. M. Chowdhury, A. Baker, and C. Wallbrink, "A review on aircraft spectra simplification techniques for composite structures," *Composites Part C: Open Access*, vol. 5, p. 100131, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100131>.
- [11.] C. Wallbrink, J. M. Hughes, and A. Kotousov, "Experimental investigation of crack opening loads in an aircraft load spectrum," *International Journal of Fatigue*, vol. 171, p. 107560, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107560>.
- [12.] M. F. Yaren and A. O. Ayhan, "A new method for prediction of fatigue crack propagation life under variable amplitude spectrum loading," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 131, p. 104355, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104355>.
- [13.] A. Chiocca, F. Frendo, and L. Bertini, "Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components," *Procedia Structural Integrity*, vol. 38, pp. 447–456, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.045>.
- [14.] Y. Guo and P. Li, "Effect of residual stress and microstructure on the fatigue crack growth behavior of aluminum friction stir welded joints," *Materials*, vol. 17, no. 2, p. 385, 2024, <https://doi.org/10.3390/ma17020385>.
- [15.] F. Chen, H. Zhang, Z. Li, Y. Luo, X. Xiao, and Y. Liu, "Residual stresses effects on fatigue crack growth behavior of rib-to-deck double-sided welded joints in orthotropic steel decks," *Advances in Structural Engineering*, vol. 27, no. 1, pp. 35–50, 2024, <https://doi.org/10.1177/13694332231213462>.
- [16.] J. W. Y. Chia, W. J. C. Verhagen, J. M. Silva, and I. Cole, "A review and outlook of airframe digital twins for structural prognostics and health management in the aviation industry," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 77, pp. 398–417, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612524002267>
- [17.] X. Lai, L. Yang, X. He, Y. Pang, X. Song, and W. Sun, "Digital twin-based structural health monitoring by combining measurement and computational data: An aircraft wing example," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 69, pp. 76–90, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.06.006>.
- [18.] L. Pinello, O. Hassan, M. Giglio, and C. Sbarufatti, "Preliminary nose landing gear digital twin for damage detection," *Aerospace*, vol. 11, no. 3, p. 222, 2024, <https://doi.org/10.3390/aerospace11030222>.
- [19.] P. R. Costa, D. Montalvão, M. Freitas, R. Baxter, and L. Reis, "Review of multiaxial testing for very high cycle fatigue: From 'conventional' to ultrasonic machines," *Machines*, vol. 8, no. 2, p. 25, 2020, <https://doi.org/10.3390/machines8020025>.
- [20.] F. Grotto, C. Bouvet, B. Castanié, and J. Serra, "Testing structural elements under multiaxial loading: A numerical model of the bench to understand and predict complex boundary conditions," *Aerospace*, vol. 11, no. 1, p. 68, 2024, <https://doi.org/10.3390/aerospace11010068>.
- [21.] P. C. Ilie and A. Ince, "Three-dimensional fatigue crack growth simulation and fatigue life assessment based on finite element analysis," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 45, no. 11, pp. 3251–3266, 2022, <https://doi.org/10.1111/ffe.13815>.
- [22.] N. Ghadarah and D. Ayre, "A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of polymer-based composites," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6945, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23156945>.

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-174-184

УДК 629.7:658.512

Головенський Володимир Васильович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-2320-0895>

Мальований Володимир Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Васін Ігор Іванович

<https://orcid.org/0000-0002-8362-9036>

Пузир Марина Сергіївна

<https://orcid.org/0009-0000-1877-4272>

*Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 10.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВО БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЧЕРЕЗ ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ

Сучасний ринок безпілотних літальних апаратів в Україні та світі характеризується високими темпами зростання, що супроводжується підвищеними вимогами до швидкості розробки, собівартості, енергоефективності та надійності. В умовах воєнного стану, дефіциту критичних комплектуючих та необхідності оперативного масштабування виробництва, традиційні методи проектування та виробництва виявляють системні обмеження. Метою даної статті є розроблення інтегрованої моделі проектування та виробництва БпЛА на засадах концепції Проектування для виробництва, що поєднує інноваційні технології та інженерні рішення для підвищення економічної ефективності, гнучкості та швидкості масштабування української дрон-економіки. Запропонована авторська модель ґрунтується на системній інтеграції генеративного штучного інтелекту, адитивного виробництва, цифрових двійників та блокчейн-трейдування, трансформуючи традиційну лінійну модель у динамічний адаптивний життєвий цикл продукту. У статті проаналізовано сучасні виклики та технологічні обмеження у сфері проектування та виробництва БпЛА в українському контексті, досліджено вплив інноваційних технологій на оптимізацію конструкцій, аеродинамічних характеристик і міцності, а також оцінено потенціал адитивного виробництва та гібридних матеріалів для зниження собівартості та скорочення часу виходу на ринок. Розроблена інтегрована DfM-модель визначає структурні компоненти та пропонує методику кількісної оцінки економічної ефективності через чисту приведену вартість та рентабельність інвестицій. Ідентифіковано ключові бар'єри впровадження моделі, такі як дефіцит кадрів, висока вартість матеріалів та нестача стандартів, та запропоновано шляхи їх подолання. Кількісна оцінка демонструє, що впровадження моделі може забезпечити зростання експортного потенціалу України до 1,8–2,2 млрд дол. США, збільшення внеску у ВВП до 2,0–2,5% та рентабельність інвестицій на рівні 200–300% протягом 3–5 років. Сформульовано практичні рекомендації для стейкхолдерів щодо впровадження моделі DfM, адаптації технічних стандартів, розвитку національної інфраструктури та інвестицій у R&D, що дозволить перетворити технологічні бар'єри на драйвери економічного зростання та забезпечити стійкість і стратегічну автономію оборонної економіки України.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, проектування та виробництво, інноваційні технології, проектування для виробництва, генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво, цифрові двійники, блокчейн-трейдування.

### Вступ

Сучасний ринок безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в Україні та світі характеризується високодинамічним зростанням в оборонному, аграрному, логістичному та моніторинговому секторах. Глобальний ринок БпЛА оцінюється як такий, що має зростати сумарним темпом (CAGR) приблизно 15–20% або більше у найближчі роки. Водночас ці галузі висувають підвищені вимоги до швидкості розробки, собівартості, енергоефективності й

надійності продукції. В умовах воєнного стану в Україні, дефіциту критичних комплектуючих та необхідності оперативного масштабування виробництва (зокрема в рамках державної ініціативи Brave1) такі вимоги набувають ще більшого значення. Традиційні методи проектування (CAD/CAE) і виробництва (CNC-обробка, ручне складання) виявляють низку системних обмежень: тривалі життєві цикли розробки, значні витрати на прототипування та обмежену гнучкість до конструктивних змін. У

такому вигляді вони не завжди дозволяють забезпечити оперативну адаптацію до швидко змінюваного ринку та впровадження інновацій. У зв'язку із цим формується об'єктивна потреба у створенні інтегрованої моделі проектування та виробництва, яка об'єднувала б параметричне моделювання, швидке прототипування, адитивне виробництво, цифрові двійники й інтелектуальну систему контролю якості. Така модель спрямована на скорочення часу виходу на ринок (time-to-market), зниження собівартості й підвищення якості БПЛА на всіх етапах їхнього життєвого циклу – від концепції до серійного виробництва.

### Матеріали та методи

Проблематика інтегрованого проектування та виробництва безпілотних літальних апаратів з використанням інноваційних технологій набуває дедалі більшої уваги у сучасній науковій літературі. Найактивніше вона розвивається через призму цифрових двійників, адитивного виробництва, генеративного дизайну та адаптації виробничих процесів до обмежень воєнного часу. І. Кабашкін [1] розробив рамкову модель цифрового двійника для управління життєвим циклом літальних апаратів на основі data-driven підходів. Модель інтегрує машинне навчання, симуляційні моделі та моніторинг у реальному часі для скорочення часу розробки, підвищення надійності конструкцій та зниження витрат на прототипування. Використання цифрових двійників забезпечує прогнозування аеродинамічних характеристик і міцності компонентів у різних експлуатаційних сценаріях, що дозволяє мінімізувати кількість фізичних ітерацій і підвищити гнучкість у разі дефіциту комплектуючих – чинника, особливо актуального для українського оборонного сектору.

В. Де Бакер та співавтори [2] аналізують дизайн для багатовісового Fused Filament Fabrication (FFF) з безперервним армуванням волокном, адаптований до конструкцій БПЛА. Завдяки орієнтації волокон уздовж силових ліній забезпечується зниження маси компонентів на 30–50% при збереженні високої питомої міцності, що підвищує аеродинамічну ефективність та дальність польоту. У подальших роботах Колозімо та ін. [3] обґрунтовується застосування методів машинного навчання для моніторингу та контролю якості в процесі лазерного порошкового наплавлення (LPBF). Гібридні сенсорні системи, що поєднують термічні, оптичні та акустичні дані з алгоритмами глибокого навчання, дозволяють знизити рівень браку на 70–85% і скоротити обсяг постобробки – критичний чинник при масштабуванні виробництва компонентів БПЛА. У ширшому огляді А. Х. Аламі та співавт. [4] підкреслюють роль адитивних технологій у зниженні маси деталей до 50%, економії матеріалів та енергії, а також у реалізації принципів сталого виробництва відповідно до SDG 9, 12 та 13. Е. Коч і співавт. [5] підтверджують ефективність використання FDM, SLA та SLS-технологій для повного циклу виробництва БПЛА – від корпусу до пропелерів,

фіксуючи зниження маси на 40–60% і собівартості на 50–70% порівняно з традиційними методами CNC.

Д. Ікбал та Б. Бухнова [6] розробили підхід до створення цифрових двійників для автономних дронів, що поєднує FSM-моделі поведінки, симуляцію в реальному часі та механізми оцінки довіри між агентами. Результати доводять ефективність DT для безпечної колаборації роїв дронів і прогнозування намірів в автономних системах. С. Суваннакхумман і А. Чуа [7] провели огляд застосувань генеративного дизайну у створенні БПЛА, зокрема для оптимізації конструкцій, аеродинаміки та енергоефективності. Вони показали, що генеративні алгоритми дозволяють знизити масу структур на 20–40% та підвищити жорсткість на 15–30%. В. Андрієс і С.-М. Захарія [8] емпірично довели, що поєднання генеративного дизайну, FEA-аналізу й 3D-друку забезпечує скорочення маси рами квадрокоптера на 35% без втрати міцності, що особливо важливо за умов дефіциту CNC-обладнання та потреби швидкого прототипування.

Р. В. Ахмад та співавт. [9] обґрунтували потенціал блокчейну в аерокосмічній і оборонній промисловості як інструмента децентралізованої довіри, безпеки даних та прозорості ланцюгів постачання. Інтеграція з IoT і смарт-контрактами дозволяє зменшити витрати на обслуговування на 10–20% та скоротити час аудиту. Водночас автори відзначають проблеми інтероперабельності, латентності та захисту конфіденційності, що обмежують масштабування таких рішень у динамічних умовах воєнного виробництва.

Звіт Київської школи економіки [10] оцінює масштабування української індустрії БПЛА в межах ініціативи Brave1: від 3–5 тис. одиниць у 2022 р. до понад 4 млн у 2024 р., із загальними інвестиціями 25 млн. дол. США і грантами 5 млн. дол. Аналіз виявляє головні бар'єри – залежність від імпорту комплектуючих (понад 80%), експортні обмеження та кадровий дефіцит – і пропонує застосування DfM-підходів для підвищення ефективності виробництва. За оглядом О. Ігнатенка [11], у 2024 р. платформа Brave1 об'єднувала близько 800 стартапів, демонструючи 75% річний приріст. Водночас сектор стикається з нестачею фінансування, дефіцитом кадрів та високим навантаженням на виробничу базу, що підкреслює актуальність модульних і швидкоітерованих моделей DfM для стійкого розвитку української дрон-економіки.

Незважаючи на зростання кількості наукових і прикладних досліджень, література поки не пропонує інтегрованої економіко-інженерної моделі, яка б поєднувала генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво, цифрові двійники та блокчейн-трейдування в єдиний DfM-цикл, адаптований до умов воєнного часу та специфіки українського ринку. Усунення цієї наукової лакуни визначає актуальність розроблення авторської концепції, спрямованої на скорочення time-to-market, підвищення технологічної

автономності та нарощення експортного потенціалу сектору БПЛА.

**Метою статті** є розроблення інтегрованої моделі проектування та виробництва безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на засадах концепції Design-for-Manufacturing (DfM), що поєднує інноваційні технології та інженерні рішення для підвищення економічної ефективності, гнучкості та швидкості масштабування в умовах розвитку української дрон-економіки. Авторський підхід ґрунтується на системній інтеграції генеративного штучного інтелекту, адитивного виробництва, цифрових двійників та блокчейн-трейдування, що дозволяє трансформувати традиційну лінійну модель виробничого процесу у динамічний адаптивний життєвий цикл продукту. Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

1. Проаналізувати сучасні виклики та технологічні обмеження у сфері проектування та виробництва БПЛА, із урахуванням українського контексту.

2. Дослідити вплив інноваційних технологій на оптимізацію конструкцій, аеродинамічних характеристик і міцності БПЛА.

3. Оцінити потенціал адитивного виробництва та гібридних матеріалів для зниження собівартості, скорочення капітальних витрат і прискорення виходу продукції на ринок.

4. Розробити авторську інтегровану DfM-модель для БПЛА, визначивши її структурні компоненти та для кількісної оцінки економічної ефективності.

5. Ідентифікувати ключові бар'єри впровадження моделі та кількісно оцінити її потенційний внесок у приріст ВВП і розширення експортного потенціалу України.

6. Сформулювати практичні рекомендації для стейкхолдерів щодо впровадження моделі DfM, адаптації технічних стандартів і розвитку національної інфраструктури виробництва БПЛА.

### Результати

Глобальний ринок безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє стале високодинамічне зростання, зумовлене мультисекторальним попитом у сферах оборони, прецизійного землеробства, логістики, геомоніторингу та охорони критичної інфраструктури. Аналітичні оцінки свідчать, що упродовж 2021–2035 рр. середньорічні темпи зростання (CAGR) становитимуть 11,7–16,3%, тоді як обсяг глобального ринку збільшиться з 70,9 млрд дол. США до 2030 р. до 191,9 млрд дол. США до 2035 р. [12–15]. Домінуючим сегментом залишається оборонний, де БПЛА забезпечують операції розвідки, спостереження, рекогносцировки (ISR) та високоточне ураження цілей у гібридних конфліктах. Водночас комерційний сектор демонструє найвищу динаміку зростання завдяки інтеграції автономних систем у сфери аерофотозйомки, моніторингу врожаю, геодезії та доставки вантажів [12–16]. Така траєкторія розвитку формує потребу у

скороченні циклів розробки, зниженні собівартості та підвищенні експлуатаційної надійності, що неможливо забезпечити в межах традиційних парадигм проектування й виробництва.

Традиційні технології комп'ютерного проектування та інженерного аналізу (CAD/CAE) і числового програмного керування верстатами (CNC) мають системні обмеження: тривалість ітераційних циклів, високу вартість інструментального оснащення та низьку адаптивність до змін конструкції. CAD/CAE-системи, попри ефективність симуляцій аеродинамічних і міцнісних характеристик, ґрунтуються на послідовному моделюванні, що спричиняє затримки від кількох тижнів до місяців під час створення складних геометрій БПЛА і не враховує мультифізичні ефекти (зокрема термодформаційні).

CNC-обробка характеризується значними витратами на оснащення (до 50% собівартості) та матеріальними втратами до 40–90% під час виготовлення композитних деталей, що гальмує серійне масштабування [4]. Унаслідок цього виникає надлишкова маса конструкцій (на 20–30% більша, ніж в адитивних аналогах), обмежується можливість інтеграції сенсорних модулів, а час виходу на ринок зростає на 30–50% у межах малих і середніх серій.

Український контекст загострює ці технологічні обмеження через поєднання воєнного стану, дефіциту критичних компонентів і необхідності швидкого нарощування виробництва. З 2022 р. національний сектор БПЛА зріс із приблизно 5 тис. одиниць до понад 4 млн у 2024 р., із потенціалом 5–10 млн одиниць щорічно за умови стабільного фінансування (зокрема, понад 2,2 млн FPV-дронів у 2024 р.) [10; 11; 16]. Україна входить до числа світових лідерів за кількістю виробників – понад 500 компаній і понад 1000 моделей. Водночас імпортна залежність сягає  $\approx 97\%$  (мікроелектроніка, літій-іонні акумулятори, оптика), що робить галузь вразливою до експортних обмежень Китаю 2025 р. та до логістичних збоїв, спричинених воєнними діями. Додатковими викликами є дефіцит інженерних кадрів CAD/CAE-профілю, обмежене бюджетне фінансування оборонних замовлень і чинна заборона на експорт, яка знижує завантаження виробничих потужностей до 30%. У сукупності ці чинники стримують інноваційний розвиток галузі та потенційно зменшують внесок у ВВП на мільярди доларів США до 2030 р. [10; 11; 16].

У таких умовах перехід до роєвих архітектур із системами штучного інтелекту та автономної навігації (зокрема антиджемінгові антени Quantum Systems, дрони-«матки» з візуально-інерційною навігацією) вимагає модульних DfM-підходів із короткими виробничими циклами (< 3 місяців), що виходить за межі можливостей традиційних методів [16].

Інституційними драйверами подолання структурних бар'єрів виступають державна платформа Brave1 та галузева екосистема

DroneUA, які формують ядро українського кластеру DefenseTech. Ініційована Міністерством цифрової трансформації у 2023 р., Brave1 об'єднує понад 800 стартапів (щорічний приріст  $\approx 75\%$ ), надає грантове фінансування ( $\approx 5$  млн дол. США) й акселераційні програми, а також запровадила систему Army of Drones Bonus (бюджет  $> 1$  млрд грн) як механізм матеріального стимулювання. Платформа виконує функції державного каталогу закупівель (Brave1 Market) і у 2025 р. фокусується на розвитку AI-керування полем бою, розв'язок систем та міжнародній кооперації (масштабування виробництва у Великій Британії, фінансування ЄС у розмірі 1,5 млрд євро), формуючи "Defense Tech Valley" як простір інтеграції NATO-сумісних стандартів [14; 16].

Компанія DroneUA, провідний системний інтегратор і дистриб'ютор Східної Європи, координує понад 700 підприємств і забезпечує повний інноваційний цикл – від AI-систем семантичної сегментації Linza/ZOOM до навчальних симуляторів LifesaverSIM (понад 80 тис. користувачів). Ці ініціативи стимулюють локалізацію виробництва до 40%, відкривають експортні канали на ринок США та створюють передумови для гармонізації технічних стандартів, що є визначальним чинником стійкості української дрон-економіки в умовах тривалої війни.

Інтеграція генеративного ШІ, параметричного моделювання та цифрових двійників зумовлює зміну парадигми проектування безпілотних літальних апаратів, забезпечуючи суттєве скорочення ітераційних циклів та підтримку мультиоб'єктивної оптимізації аеродинамічних і структурних параметрів. Сучасні дослідження показують, що використання генеративних алгоритмів і методів навчання з підкріпленням дає змогу автоматизувати процес синтезу форм, зменшити розмірність простору проектування та підвищити ефективність пошуку оптимальних рішень [17–19].

У межах генеративних підходів мережі антагоністичного навчання (Bézier-GAN) застосовуються для компактного кодування аеродинамічних профілів у латентному просторі низької розмірності, що зменшує кількість змінних і підвищує збіжність оптимізації порівняно з традиційними параметризаціями PARSEC чи CST [17]. Варіаційно-антагоністичні моделі (VAE-GAN, Airfoil GAN) поєднують автоенкодер та генератор для синтезу аеропробів без попереднього задання геометричних параметрів, забезпечуючи еволюцію форм у латентному просторі та оптимізацію співвідношення підйомної сили до опору ( $C_l/C_d$ ) [18]. Методи навчання з підкріпленням, зокрема Proximal Policy Optimization (PPO), розглядають формування аеропробів як задачу марковського процесу прийняття рішень: агент послідовно модифікує контур, отримуючи винагороду за покращення аеродинамічних показників. Такі підходи доводять ефективність у порівнянні з градієнтними

методами та демонструють вищу стійкість до шуму в оцінках CFD [19].

Паралельно з цим розвиваються математичні моделі мультифізичної оптимізації, що формалізують компроміси між аеродинамічним опором ( $C_d$ ), структурною деформацією ( $\delta_{max}$ ) та масою ( $m$ ) через нелінійне програмування у формі

$$\min F(x) = w_1 m(x) + w_2 C_d(x) + w_3 \delta_{max}(x), \quad (1)$$

де вагові коефіцієнти  $w_i$  адаптуються до режимів експлуатації (наприклад, ройові місії чи тривала розвідка). Інтеграція такого підходу з адитивним виробництвом підсилює реалізацію DfM-принципів, скорочуючи етапи постобробки та матеріальні втрати [4, 8]. Додатково, автоматизоване перетворення результатів топологічної оптимізації у параметричні CAD-моделі на основі алгоритмів розпізнавання гратчастих структур дозволяє зменшити час переходу від симуляції до виробництва та мінімізує людське втручання у моделюванні [20].

Цифрові двійники слугують віртуальними репліками фізичних систем, які поєднують дані реального часу з високоточними моделями (FEM, CFD) для віртуального тестування та прогнозування поведінки в екстремальних умовах без необхідності створення фізичних прототипів [1, 6]. Розроблені DT-архітектури включають підсистеми сприйняття (LiDAR, камери), планування траєкторій (A\*, RRT\*), навігації (EKF, UKF) та керування (PID, MPC), забезпечуючи повну цифрову репрезентацію життєвого циклу від проектування до експлуатації з інтеграцією в ROS2 та Gazebo [21]. Стандарти ISO/DIS 23247-5 визначають методологію «digital thread» як інформаційний ланцюг, що забезпечує трасування даних від CAD-середовища до IoT-сенсорів та підтримку цифрових двійників на всіх етапах життєвого циклу виробу [22], що дозволяє гармонізувати дані між підсистемами проектування, виробництва та експлуатації, забезпечуючи високий рівень відтворюваності і сертифікаційної прозорості для оборонних застосувань.

Емпіричні результати застосування генеративного дизайну та адитивного виробництва в конструкціях БпЛА демонструють зменшення маси до 20–40% та підвищення жорсткості до 15–30% залежно від матеріалу й умов експлуатації [7, 8]. Узагальнення цих технологій у єдину DfM-модель дозволяє перейти від лінійної схеми "проектування – виробництво" до адаптивного цифрового циклу, що скорочує час виходу на ринок та зменшує ризики невідповідності між віртуальним і фізичним виробом.

Поєднання генеративного ШІ, адитивного виробництва (AM), цифрових двійників та інструментів трейсованості на основі блокчейну формує адаптивний DfM-цикл, який забезпечує узгоджений перехід від концептуального проектування до серійного випуску та експлуатаційного моніторингу БпЛА. На рівні проектування генеративні методи (зокрема моделі

GAN, VAEGAN і RL) скорочують розмірність простору варіантів і підтримують мультиоб'єктивну оптимізацію параметрів маси, жорсткості та аеродинаміки [7, 8]. DfAM-принципи, окреслені в систематичних оглядах, орієнтують конструкції на виробничу придатність: консолідацію деталей (зменшення кількості складальних одиниць), оптимізацію решітчастих структур (*lattice*), мінімізацію опор і інтеграцію функціональних елементів (канали охолодження, сенсорні ніші), що в сукупності може забезпечувати істотне зниження маси та витрат порівняно з традиційними технологіями [23].

Як виконавчий шар, адитивне виробництво реалізує складні геометрії та характеризується високим коефіцієнтом використання матеріалу. Згідно з дослідженнями в аерокосмічній галузі, коефіцієнт *buy-to-fly* (BTF) для AM становить близько 1:1–3:1, тоді як для фрезерування з масивних заготовок – до 11:1, а в окремих випадках знижується з 33:1 до 1:1 при переході на металеве AM-виробництво [4; 27; 28], що прямо впливає на собівартість, логістику матеріалів і сталий розвиток.

Цифрові двійники забезпечують віртуальну валідацію конструкцій і переносять частину випробувань у симуляційне середовище (SiL/HiL), даючи змогу прогнозувати поведінку конструкцій у реальному часі (деформації, деградація вузлів, вплив температурних градієнтів) [1; 6]. Методологія *digital thread*, визначена в ISO/DIS 23247-5 та програмі NIST Digital Thread for Manufacturing, формує наскрізний інформаційний ланцюг життєвого циклу виробу – від CAD/CAE-моделі до виробництва й експлуатації – із правилами структурування даних, трасування змін і вимогами до сумісності PLM–MES–IoT [22; 24].

На рівні трейсованості впровадження блокчейну підвищує прозорість ланцюга постачань: забезпечує автентичність компонентів, антифальсифікаційний контроль, сертифікацію матеріалів і захист інтелектуальної власності. У сфері аерокосмічної й оборонної промисловості такі системи застосовують для смарт-контрактів у MRO та відстеження походження матеріалів [9].

Економічна ефективність DfM-моделі оцінюється через чисту приведену вартість (NPV) та рентабельність інвестицій (ROI), що відображають зниження витрат на прототипування (до 70–90%) і скорочення *time-to-market* (до 50–80%). Формально:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0, ROI = \frac{NPV}{I_0} \times 100\%, \quad (2)$$

де  $CF_t$  – грошовий потік у період  $t$ ;  
 $r$  – ставка дисконту (8–12% для DefenseTech);  
 $I_0$  – початкові інвестиції;  
 $T$  – горизонт планування (3–5 років) [25].

Методичну основу для оцінювання формують NIST SP 1176 і дослідження з техніко-

економічного аналізу адитивного виробництва, які показують залежність ефективності від серійності, складності геометрії та обсягу постобробки [4; 25].

У контексті української дрон-економіки DfM-підхід реалізується у гібридних кластерах Brave1 і DroneUA, де генеративний дизайн застосовується для оптимізації рам FPV-дронів (зменшення маси на 25–35%), 3D-друк на FDM/SLS-системах забезпечує серійність до 80 тис. одиниць на місяць, а DT супроводжує симуляцію бойових навантажень і підвищує готовність до масштабування [10; 11; 16]. Комплексна інтеграція цих елементів створює замкнену DfM-архітектуру, яка поєднує швидку адаптацію конструкцій, ефективність виробництва й довіру до ланцюгів постачань.

Інтеграція DfM-моделі, що поєднує генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво (AM), цифрових двійників і блокчейн-трейсованість, формує потужний економічний імпульс для української дрон-індустрії. Перехід від імпортозалежного до експортно орієнтованого виробництва може забезпечити до 2 млрд дол. США експортного обсягу до 2030 р., за умови локалізації виробництва на 60–70% і приєднання до НАТО-сумісних ланцюгів постачань [10; 14; 32]. Така динаміка потенційно збільшить внесок у ВВП оборонно-промислового комплексу на 1,5–2,5%, зменшивши імпорту залежність із 97% до менш як 50% і довівши серійний випуск до 8–10 млн. одиниць на рік. Очікуваний ROI DfM-підходу становить 150–300% протягом 3–5 років, що пояснюється зниженням собівартості на 50–70% і скороченням *time-to-market* на 60–80%, відкриваючи нові ринки ЄС, США та Близького Сходу [25; 32].

Водночас масштабування DfM-рішень обмежується низкою системних бар'єрів. Дослідження [29] класифікують 18 чинників, що стримують промислове впровадження AM: дефіцит кадрів, висока вартість матеріалів, нестача стандартів, обмеження обладнання, проблеми з повторюваністю та контролем якості. Найкритичнішими для України є саме матеріали, програмне забезпечення та освіта, що визначають готовність до переходу від прототипування до серійного виробництва. AM-технології змінюють структуру постачань із глобальної на регіональну, скорочуючи час виконання на 40–70%. Проте це супроводжується високими витратами на матеріали, браком стандартизації, нестачею персоналу, складністю інтеграції з ERP/MES-системами та ризиками постачання [30].

У військовій сфері AM швидше впроваджується у MRO-сегменті (on-demand-виробництво та ремонт на місці), тоді як первинне виробництво стримується сертифікаційними процедурами й вартісними обмеженнями. Україна виступає прикладом краудсорсинг-мережі виробників, де поєднання промислових і волонтерських ініціатив формує гнучку екосистему компонентів для ЗСУ, але потребує

професіоналізації, регуляції та захисту інтелектуальної власності [31].

Україна має високий інвестиційний потенціал галузі: світовий ринок БПЛА зростає з 73 млрд дол. США (2024 р.) до 163–223 млрд. дол. США (2030–2034 р.), а Україна вже виробляє понад 1

млн дронів на рік. Інвестиції приватних і міжнародних компаній (зокрема Renault, 2025 р.) свідчать про зростання довіри та інтеграцію у глобальні ланцюги постачань [10; 32].

Таблиця 1

**Кількісна оцінка економічного потенціалу та бар'єрів впровадження DfM-моделі для виробництва БПЛА в Україні**

Показник	Базовий сценарій (2024 р.)	Прогноз із DfM (2030 р.)	$\Delta$ (%)	Ключові бар'єри (за [29–31])	Шляхи подолання
Експортний обсяг (млрд USD)	0,1–0,2	1,8–2,2	+900–1100	Матеріали, стандарти, сертифікація	Гармонізація ISO/ASTM; сертифікація через Brave1; консалтинг M&A [32]
Внесок у ВВП (%)	0,5–0,8	2,0–2,5	+150–200	Вартість, освіта, інтеграція ERP	Локальні мікрохаби; державні гранти; експортні стратегії [32]
ROI інвестицій (%)	80–120	200–300	+150–180	Кіберризика, повторюваність, MRO	Квантові протоколи; мобільні MRO-центри; ризик-менеджмент [32]
Серійний випуск (млн од./рік)	4,0	8–10	+100–150	Обладнання, моніторинг, постачальники, постобробка	Автоматизація; "right to repair"; партнерства (Renault тощо) [32]

Джерело: складено автором на основі [10; 11; 12; 14; 16; 25; 29–32]

### Обговорення

Аналіз таблиці 1 підтверджує синергійний ефект DfM-моделі: приріст експорту на 900–1100% не лише компенсує імпорту вразливість, а й генерує мультиплікативний ефект для суміжних секторів, потенційно додаючи 5–7 млрд USD кумулятивного експорту до 2030 р. Гармонізація стандартів (ISO/ASTM) може скоротити час сертифікації компонентів із 12–18 місяців до 3–6, а завантаження виробничих потужностей – підвищити з 30% до 80%. Інвестування в R&D (понад 100 млн USD через публічно-приватні партнерства) забезпечить технологічну автономність, мінімізуючи логістичні ризики.

Наразі [29], 64% компаній вказують на брак CAD-інструментів для AM-дизайну, а 73% – на дефіцит матеріалів. Виробництво за запитом (on-demand manufacturing) та принцип конструктивної ремонтпридатності (repairability by design) виступають ключовими чинниками оперативної готовності у військових застосуваннях. Дослідження [31], демонструють практичний вимір розвитку галузі: у 2025 р.: компанія Renault оголосила про інвестиції у виробництво дронів в Україні; обсяг глобального ринку БПЛА перевищив 160 млрд USD; в Україні у 2024 р. виготовлено понад 1 млн апаратів, а до 2025 р. прогнозується зростання до 4,5 млн одиниць. З урахуванням цих факторів, DfM-модель перетворює технологічні бар'єри на драйвери економічного зростання, забезпечуючи стійкість і

стратегічну автономію оборонної економіки України в умовах гібридних загроз.

### Висновки

Проведений аналіз підтверджує, що впровадження інтегрованої DfM-моделі, яка поєднує генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво, цифрових двійників і блокчейн-трейсованість, має потужний трансформаційний потенціал для української дрон-економіки. Ця модель здатна забезпечити перехід від імпортозалежного сектору до конкурентоспроможного експортного кластера з внеском у ВВП до 2,5% і експортом до 2 млрд USD до 2030 р. Її ефективність визначається не лише технологічними інноваціями, а й здатністю подолати структурні бар'єри, виявлені у дослідженнях [29–31], та інституціоналізувати інноваційні практики, апробовані під час війни.

Для переходу від прототипування до серійного виробництва з локалізацією понад 70% необхідно створити 5–10 національних центрів компетенцій у форматі публічно-приватних партнерств. Вони мають фокусуватися на розвитку адитивних матеріалів і процесів (гібридні композити, металеві порошки), впровадженні генеративного ШІ та цифрових двійників для оптимізації конструкцій і симуляції експлуатаційних навантажень, забезпеченні кіберстійкості через блокчейн-трейсованість і квантово-стійке шифрування, а також на розробленні мобільних рішень для технічного обслуговування за запитом

(on-demand manufacturing) із конструктивною ремонтпридатністю (repairability by design) як ключовими чинниками оперативної готовності.

Доцільним є створення таких центрів у кластерному форматі (Київ, Львів, Харків, Дніпро) з інтеграцією в університетське середовище (КПІ, ХНУРЕ) та орієнтацією на публічно-приватне фінансування (Brave1, інвестори на кшталт Renault). Цільовий бюджет має становити не менше 100 млн USD, із поєднанням державних грантів, прямих іноземних інвестицій і військово-технологічного венчурного капіталу. Паралельно слід розвивати освітню складову: інтегрувати модулі DfAM, AM і цифрових двійників у навчальні програми технічних університетів, запровадити програми перекваліфікації для щонайменше 50 тис. фахівців до 2030 р., розширити партнерства з ЄС у межах програм Erasmus+ та Horizon Europe.

Подальші дослідження мають зосередитися на застосуванні квантових обчислень для генеративного дизайну, що дозволить моделювати мільйони варіантів аеродинаміки та структур у режимі реального часу, скорочуючи time-to-market на 90%. Перспективним напрямом є також розвиток роевих технологій із використанням цифрових двійників і блокчейну для децентралізованої координації автономних систем, стійких до засобів радіоелектронної боротьби, та інтеграції з інфраструктурою 6G. У сфері матеріалознавства доцільним є дослідження гібридних AM-матеріалів із функцією самовідновлення, придатних для оперативного ремонту в польових умовах, а в економічному вимірі – побудова економетричних моделей ROI для порівняння ефективності DfM і традиційного виробництва в умовах гібридної війни.

Україна має унікальне вікно можливостей для перетворення воєнних інновацій на джерело сталого економічного зростання. Формування мережі центрів компетенцій, державна підтримка DfM-технологій і стратегічні інвестиції у R&D дозволять не лише вийти на глобальний ринок обсягом понад 160 млрд. дол. США, але й утвердити Україну як НАТО-сумісний хаб дрон-технологій, що забезпечить технологічний суверенітет і довгострокову економічну стійкість держави.

### Список використаних джерел

- [1.] I. Kabashkin, "Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models," *Mathematics*, vol. 12, no. 19, p. 2979, 2024, doi: 10.3390/math12192979. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/19/2979>. [Дата звернення: 3 листоп. 2025].
- [2.] W. De Backer, P. Sinkez, R. D'Cunha, and M. Van Tooren, "Design for multi-axis fused filament fabrication with continuous fiber reinforcement: Unmanned aerial vehicle applications," 2018, doi: 10.2514/6.2019-0156. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-0156>. [Дата звернення: 3 листоп. 2025].
- [3.] B. M. Colosimo, S. Maggi, M. Grasso, and F. Caldirola, "In-process monitoring and control for laser powder bed fusion: A statistical perspective," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2024, <https://doi.org/10.1002/asmb.70001.1002/asmb.70001>.
- [4.] A. H. Alami та ін., "Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 12, p. 102516, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>.
- [5.] E. Koç, C. Caliskan, M. Coşkun, and H. Khan, "Unmanned aerial vehicle production with additive manufacturing," *Journal of Aviation*, vol. 4, no. 1, pp. 22–30, 2020, <https://doi.org/10.30518/jav.681037>.
- [6.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," in *Proc. 19th Conf. Comput. Sci. Intell. Syst. (FedCSIS)*, 2024, pp. 119–130, <https://doi.org/10.15439/2024F6765>.
- [7.] S. Souvahnakhoomman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, <https://doi.org/10.11113/aej.V15.21286>.
- [8.] V. Andries and S.-M. Zaharia, "Generative design, simulation, and 3D printing of the quadcopter drone frame," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 17, p. 9647, 2025, <https://doi.org/10.3390/app15179647>.
- [9.] R. W. Ahmad, H. Hasan, I. Yaqoob, K. Salah, R. Jayaraman, and M. Omar, "Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106982, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106982>.
- [10.] Kyiv School of Economics, Brave1 Report v.1: Scaling Ukraine's Defense Tech Ecosystem, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Brave1-report-v.1.pdf>.
- [11.] AIN.UA, "Ukrainian defense tech in 2024 and prospects for 2025," 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://en.ain.ua/2025/01/31/ukrainian-defense-tech-in-2024/>.
- [12.] Fortune Business Insights, Unmanned Aerial Vehicle [UAV] Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2032, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-101603>.
- [13.] Allied Market Research, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Product Type, Component, Application, Mode of Operation, Range, and End User: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно:

- <https://www.alliedmarketresearch.com/unmanned-aerial-vehicle-market-A09059>.
- [14.] "Official website of the Brave1 platform," Brave1, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://brave1.gov.ua/>.
- [15.] Research Nester, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Size and Forecast, by Application... Growth Trends, Key Players, Regional Analysis 2026-2035, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.researchnester.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-market/6364>.
- [16.] В. Недашківський, "Кара небесна: Топ-10 видів безпілотників української індустрії дронів," Бізнес Цензор, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://censor.net/biz/resonance/3573048/top-10-vydiv-bezpilotnykiv-ukrayinskoyi-industriyi-droniv>.
- [17.] W. Chen, K. Chiu, and M. D. Fuge, "Airfoil design parameterization and optimization using bézier generative adversarial networks," AIAA Journal, vol. 58, no. 11, pp. 4723–4735, 2020. Доступно: <https://arxiv.org/pdf/2006.12496>.
- [18.] Y. Wang, K. Shimada, and A. Barati Farimani, "Airfoil GAN: Encoding and synthesizing airfoils for aerodynamic shape optimization," Journal of Computational Design and Engineering, vol. 10, no. 4, pp. 1350–1362, 2023. Доступно: <https://arxiv.org/pdf/2101.04757>.
- [19.] T. P. Dussauge, W. Sung, O. J. Pinon Fischer, та ін., "A reinforcement learning approach to airfoil shape optimization," Scientific Reports, vol. 13, p. 9753, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36560-z>.
- [20.] J. Polak and M. Nowak, "From structural optimization results to parametric CAD modeling—automated, skeletonization-based truss recognition," Applied Sciences, vol. 13, no. 9, p. 5670, 2023, <https://doi.org/10.3390/app13095670>.
- [21.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," pp. 119–130, 2024, <https://doi.org/10.15439/2024F6765>.
- [22.] International Organization for Standardization, Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.iso.org/standard/87425.html>.
- [23.] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah, and A. M. Al-Ahmari, "Design for additive manufacturing: A systematic review," Sustainability, vol. 12, no. 19, p. 7936, 2020, <https://doi.org/10.3390/su12197936>.
- [24.] International Organization for Standardization, Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5, 2025. Доступно: <https://www.iso.org/standard/87425.html>; та National Institute of Standards and Technology (NIST), Digital Thread for Manufacturing, 2025. [Електронний ресурс]. [Доступно: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-manufacturing>.
- [25.] M. Sartini, C. Favi, and M. Mandolini, "Rapid investment casting: a techno-economic analysis for evaluating VAT photopolymerisation processes," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 134, pp. 5717–5739, 2024, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14331-y>.
- [26.] S. Souvannakhoonman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," ASEAN Engineering Journal, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, <https://doi.org/10.11113/aej.V15.21286>.
- [27.] B. Blakey-Milner та ін., "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," Materials & Design, vol. 209, p. 110008, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
- [28.] R. Dehoff та ін., "Case study: Additive manufacturing of aerospace brackets," Advanced Materials & Processes, p. 1, берез. 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://scispace.com/pdf/case-study-additive-manufacturing-of-aerospace-brackets-53n5x6c5tb.pdf>.
- [29.] L. Thomas-Seale, J. Kirkman-Brown, D. Espino, M. Attallah, and D. Shepherd, "The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry," International Journal of Production Economics, vol. 198, pp. 104–118, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>.
- [30.] A. Ronchini, A. M. Moretto, and F. Caniato, "Adoption of additive manufacturing technology: Drivers, barriers and impacts on upstream supply chain design," International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 53, no. 4, pp. 532–554, 2023, <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2021-0541>.
- [31.] L. Suckau, "Additive manufacturing in the military technology sector: Application and proliferation of an emerged technology," Peace Research Institute Frankfurt (PRIF), PRIF Report 3/2025, 2025, <https://doi.org/10.48809/prifrep2503>.
- [32.] "Drone production in Ukraine: A high-growth investment opportunity," UA Consulting Blog, 8 черв. 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uaconsulting.eu/2025/06/08/drone-production-in-ukraine/>.

**Volodymyr Holovenskyi** (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-2320-0895>

**Volodymyr Malovanyi** (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

**Ihor Vasin**

<https://orcid.org/0000-0002-8362-9036>

**Maryna Puzyr**

<https://orcid.org/0009-0000-1877-4272>

*Kremenchuk Flight College Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine*

## DESIGN AND MANUFACTURING OF UNMANNED AERIAL VEHICLES THROUGH INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND ENGINEERING SOLUTIONS

*The modern market of Unmanned Aerial Vehicles in Ukraine and worldwide is characterized by high growth rates, accompanied by increased demands for development speed, cost-effectiveness, energy efficiency, and reliability. Under the conditions of martial law, a deficit of critical components, and the need for rapid production scaling, traditional design and manufacturing methods reveal systemic limitations. The purpose of this article is to develop an integrated design and manufacturing model for UAVs based on the Design-for-Manufacturing concept, which combines innovative technologies and engineering solutions to enhance the economic efficiency, flexibility, and scaling speed of the Ukrainian drone economy. The proposed author's model is based on the systematic integration of generative artificial intelligence, additive manufacturing, digital twins, and blockchain traceability, transforming the traditional linear model into a dynamic adaptive product lifecycle. The article analyzes contemporary challenges and technological constraints in UAV design and manufacturing within the Ukrainian context, investigates the impact of innovative technologies on optimizing structures, aerodynamic characteristics, and strength, and assesses the potential of additive manufacturing and hybrid materials for cost reduction and accelerated market entry. The developed integrated DfM model defines structural components and proposes a methodology for quantitative assessment of economic efficiency through Net Present Value and Return on Investment. Key barriers to the model's implementation are identified, such as personnel shortages, high material costs, and a lack of standards, and pathways to overcome them are proposed. Quantitative assessment demonstrates that the implementation of the model could ensure an increase in Ukraine's export potential to 1.8–2.2 billion USD, an increase in GDP contribution to 2.0–2.5%, and an ROI of 200–300% over 3–5 years. Practical recommendations for stakeholders are formulated regarding the implementation of the DfM model, adaptation of technical standards, development of national infrastructure, and investment in R&D, which will transform technological barriers into drivers of economic growth and ensure the resilience and strategic autonomy of Ukraine's defense economy.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicles, design and manufacturing, innovative technologies, design-for-manufacturing, generative artificial intelligence, additive manufacturing, digital twins, blockchain traceability.*

### References

- [1.] I. Kabashkin, "Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models," *Mathematics*, vol. 12, no. 19, p. 2979, 2024, doi: 10.3390/math12192979. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/19/2979>.
- [2.] W. De Backer, P. Sinkez, R. D'Cunha, and M. Van Tooren, "Design for multi-axis fused filament fabrication with continuous fiber reinforcement: Unmanned aerial vehicle applications," 2018, doi: 10.2514/6.2019-0156. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-0156>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [3.] B. M. Colosimo, S. Maggi, M. Grasso, and F. Caldirola, "In-process monitoring and control for laser powder bed fusion: A statistical perspective," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2024, doi: 10.1002/asmb.70001. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/asmb.70001>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [4.] A. H. Alami et al., "Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 12, p. 102516, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102516. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [5.] E. Koç, C. Caliskan, M. Coşkun, and H. Khan,

- "Unmanned aerial vehicle production with additive manufacturing," *Journal of Aviation*, vol. 4, no. 1, pp. 22–30, 2020, doi: 10.30518/jav.681037. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/342378203\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicle\\_Production\\_with\\_Additive\\_Manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/342378203_Unmanned_Aerial_Vehicle_Production_with_Additive_Manufacturing). [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [6.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," in *Proc. 19th Conf. Comput. Sci. Intell. Syst. (FedCSIS)*, 2024, pp. 119–130, doi: 10.15439/2024F6765.
- [7.] S. Souvahnakhoomman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, doi: 10.11113/aej.V15.21286. [Online]. Available: <https://journals.utm.my/aej/article/view/21286>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [8.] V. Andries and S.-M. Zaharia, "Generative design, simulation, and 3D printing of the quadcopter drone frame," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 17, p. 9647, 2025, doi: 10.3390/app15179647. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/17/9647>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [9.] R. W. Ahmad, H. Hasan, I. Yaqoob, K. Salah, R. Jayaraman, and M. Omar, "Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106982, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106982.
- [10.] Kyiv School of Economics, *Bravel Report v.1: Scaling Ukraine's Defense Tech Ecosystem*, 2024. [Online]. Available: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Bravel-report-v.1.pdf>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [11.] AIN.UA, "Ukrainian defense tech in 2024 and prospects for 2025," 2025. [Online]. Available: <https://en.ain.ua/2025/01/31/ukrainian-defense-tech-in-2024/>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [12.] Fortune Business Insights, *Unmanned Aerial Vehicle [UAV] Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2032*, 2025. [Online]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-101603>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [13.] Allied Market Research, *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Product Type, Component, Application, Mode of Operation, Range, and End User: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030*, 2021. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/unmanned-aerial-vehicle-market-A09059>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [14.] "Official website of the Bravel platform," *Bravel*, 2025. [Online]. Available: <https://bravel.gov.ua/>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [15.] Research Nester, *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Size and Forecast, by Application... Growth Trends, Key Players, Regional Analysis 2026-2035*, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchnester.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-market/6364>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [16.] V. Nedashkivskyi, "Heaven's punishment: Top 10 types of drones of the Ukrainian drone industry," *Biznes Tsenzor*, 2025. [Online]. Available: <https://censor.net/biz/resonance/3573048/top-10-vydiv-bezpilotnykiv-ukrayinskoyi-industriyi-droniv>. [Accessed: Nov. 3, 2025]. (in Ukrainian)
- [17.] W. Chen, K. Chiu, and M. D. Fuge, "Airfoil design parameterization and optimization using bézier generative adversarial networks," *AIAA Journal*, vol. 58, no. 11, pp. 4723–4735, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2006.12496>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [18.] Y. Wang, K. Shimada, and A. Barati Farimani, "Airfoil GAN: Encoding and synthesizing airfoils for aerodynamic shape optimization," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 1350–1362, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2101.04757>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [19.] T. P. Dussauge, W. Sung, O. J. Pinon Fischer, et al., "A reinforcement learning approach to airfoil shape optimization," *Scientific Reports*, vol. 13, p. 9753, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-36560-z.
- [20.] J. Polak and M. Nowak, "From structural optimization results to parametric CAD modeling—automated, skeletonization-based truss recognition," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, p. 5670, 2023, doi: 10.3390/app13095670.
- [21.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," pp. 119–130, 2024, doi: 10.15439/2024F6765.
- [22.] International Organization for Standardization, *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5*, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/87425.html>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [23.] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah, and A. M. Al-Ahmari, "Design for additive manufacturing: A systematic review," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 7936, 2020, doi: 10.3390/su12197936.
- [24.] International Organization for Standardization, *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5*, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/87425.html>; and

- National Institute of Standards and Technology (NIST), Digital Thread for Manufacturing, 2025. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-manufacturing>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [25.] M. Sartini, C. Favi, and M. Mandolini, "Rapid investment casting: a techno-economic analysis for evaluating VAT photopolymerisation processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 134, pp. 5717–5739, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14331-y.
- [26.] S. Souvahnakhoomman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, doi: 10.11113/aej.V15.21286.
- [27.] B. Blakey-Milner et al., "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [28.] R. Dehoff et al., "Case study: Additive manufacturing of aerospace brackets," *Advanced Materials & Processes*, p. 1, Mar. 2013. [Online]. Available: <https://scispace.com/pdf/case-study-additive-manufacturing-of-aerospace-brackets-53n5x6c5tb.pdf>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [29.] L. Thomas-Seale, J. Kirkman-Brown, D. Espino, M. Attallah, and D. Shepherd, "The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry," *International Journal of Production Economics*, vol. 198, pp. 104–118, 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.02.003.
- [30.] A. Ronchini, A. M. Moretto, and F. Caniato, "Adoption of additive manufacturing technology: Drivers, barriers and impacts on upstream supply chain design," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 53, no. 4, pp. 532–554, 2023, doi: 10.1108/IJPDLM-12-2021-0541.
- [31.] L. Suckau, "Additive manufacturing in the military technology sector: Application and proliferation of an emerged technology," *Peace Research Institute Frankfurt (PRIF), PRIF Report 3/2025*, 2025, doi: 10.48809/prifrep2503.
- [32.] "Drone production in Ukraine: A high-growth investment opportunity," *UA Consulting Blog*, Jun. 8, 2025. [Online]. Available: <https://uaconsulting.eu/2025/06/08/drone-production-in-ukraine/>. [Accessed: Nov. 3, 2025].

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-185-194**

**УДК 004.942:629.7**

**Сафонов Ігор Євгенович** (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0001-5717-2813>

**Коровін Іван Павлович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-4645-9688>

*Національний університет оборони України, м. Київ, Україна*

*Рукопис надійшов до редакції: 30.12.2025; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ФУНКЦІ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ АГРЕГАТІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ МЕХАНІЧНОГО ТИПУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИФУЗІЙНО-МОНОТОННОГО ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН**

*Випадковий характер появи відмов у системах авіаційної техніки та неможливість прогнозування деяких аварійних ситуацій призводять до втрати чималого часу для виявлення причин їх появи. Останнім часом, для прогнозування технічного стану авіаційної техніки, дослідниками успішно застосовуються ймовірнісно-фізичні моделі надійності, які враховують фізичні процеси деградації.*

*У статті представлено імітаційну модель на основі дифузійно-монотонного закону розподілу відмов, який вважається перспективним в наукових дослідженнях деградаційних процесів, що відбуваються в системах і агрегатах старіючої авіаційної техніки. Параметри представленого розподілу можуть визначатися на основі статистичних характеристик відмов або на основі аналізу фізичного процесу відмов, що дає певну перевагу перед ймовірнісними моделями. Аналіз поведінки функції інтенсивності відмов дає можливість прогнозування технічного стану агрегатів механічного типу, в яких відбуваються зміни фізичних параметрів монотонного характеру.*

*Для адекватного відображення поведінки функції інтенсивності відмов агрегатів механічного типу запропоновано імітаційне моделювання за допомогою програмного забезпечення Simulink. Результати моделювання представлені у вигляді графіків.*

**Ключові слова:** *функція розподілу, модель відмов, прогнозування технічного стану, моделювання, авіаційна техніка, надійність.*

### **Вступ**

Контроль показників надійності авіаційної техніки (АТ) в сучасних умовах технічної експлуатації необхідний для виявлення моментів виникнення деградаційних процесів, зумовлених дією різноманітних факторів, проте існуючі методики мають великі похибки і не дозволяють коректно проводити розрахунки показників надійності АТ, яка експлуатується понад призначений термін служби [1, 2].

Основні труднощі розробки моделей прогнозування і управління показниками надійності АТ пов'язані з тим, що вихідна інформація про закономірності зміни її параметрів мала, а методики оцінювання показників надійності за статистичними даними про відмови АТ вимагають значної кількості статистичних даних про відмови [3]. Проте, як зазначено в [4], дані реальної експлуатації АТ зазвичай є неповними або недостатньо точними, що пов'язано з організаційними труднощами збирання та оброблення відомостей, трудомісткістю досліджень, недостатньою чутливістю та точністю апаратури, яка викликає хибні відмови, не завжди високою кваліфікацією виконавців. При таких умовах дослідникам

доводиться робити оцінювання і прогнозування показників надійності АТ з використанням існуючого науково-методичного апарату (математична статистика, теорія випадкових функцій та ймовірнісні концепції) [5]. Нажаль це не надає можливості отримати адекватні результати [2, 6].

За результатами проведеного аналізу можна стверджувати, що:

існуючі методики оцінювання показників надійності не відповідають сучасним вимогам, оскільки в існуючій технології дослідження дуже відрізняються прогнозовані оцінки та реальні значення показників надійності;

необхідно змінювати існуючу систему обліку, збирання й аналізу відмов тому, що система недосконала, а статистика неправдоподібна;

застосування існуючого науково-методичного апарату через отримання грубих і завищених прогнозів показників надійності робить проблематичним впровадження сучасних цифрових технологій.

Все це обумовлює необхідність проведення критичного аналізу відомих моделей відмов [1].

Для розв'язання задач оцінювання показників надійності й прогнозування технічного стану АТ потрібно створити математичну модель, яку можна

описати аналітичними виразами одного з показників  $P(t)$ ,  $f(t)$  або  $\lambda(t)$  [7]. У подальшому, шляхом проведення імітаційного моделювання цього показника за допомогою прикладних програм, можна отримати модель прогнозування технічного стану агрегатів АТ [5].

У зв'язку з цим сформульована основна науково-технічна задача – створення моделі прогнозування інтенсивності відмов агрегатів АТ механічного типу на основі дифузійно-монотонного (DM) розподілу випадкових величин [1].

**Метою дослідження** є створення імітаційної моделі інтенсивності відмов для об'єктів механічного типу, яким притаманні процеси механічного зношування, корозії, втоми, старіння.

### Матеріали та методи

У роботі запропоновано загальний підхід до вирішення завдань надійності з використанням інтерактивного інструменту Simulink. За результатами аналізу основних формул теорії надійності запропоновано новий підхід щодо представлення законів розподілу випадкових величин у вигляді блоків для Simulink [8, 9].

Вибір методу дослідження ґрунтується на підставі властивостей моделі. Дослідження поведінки функції інтенсивності відмов проведено теоретичним та емпіричним методами [10]. Імітаційну модель створено на основі досвіду розроблення і використання моделей аналогів. За результатами проведення імітаційного моделювання отримана інформація оброблена чисельним методом [10, 11]. Аналітичні вирази перетворено у кількісні характеристики функцій, які визначають значення основних параметрів для прогнозування технічного стану агрегатів авіаційної техніки механічного типу [12]. У статті представлено графіки залежностей інтенсивності відмов від параметрів масштабу і параметрів форми.

Аналіз літературних джерел. Проведений аналіз публікацій та нормативно-технічних матеріалів щодо методів оцінювання ризику появи відмов складних технічних систем показав, що більшість з них розглядають лише окремі послідовності подій. Більшість методів оцінювання засновані на тому, що всі елементи системи працюють у штатних режимах [5].

Строго ймовірнісні концепції надійності були визнані недостатніми на початку розвитку надійності як науки. Так, академік Гніденко Б.В. відзначав, що підвищенню можливостей теорії та практики надійності сприяє включення до неї фізичних уявлень про сам процес зношення. Інші дослідники, такі як Соткова Б.С., [6, 7] визнали, що поєднання ймовірнісних методів із фізичною сутністю процесів у виробках, є найбільш правильним напрямом подальшого розвитку теорії надійності, а вивчення питань надійності виробів необхідно розпочинати з їх механіко-фізико-хімічних властивостей.

У статті [1] зазначено, що застосування відомих параметричних та ймовірнісних методів

оцінювання безвідмовності не дає змоги отримати адекватні результати.

Питання неадекватності експоненціальної моделі дійсних процесів зміни надійності агрегатів поставлені у роботі [13]. Використовуючи експоненціальний розподіл, дослідники приймають припущення про незмінність інтенсивності відмов, а використання дифузійних розподілів показує, що реальне значення інтенсивності відмов за прийнятні проміжки часу збільшується.

Розроблення математичної моделі для розрахунку показників залишкового ресурсу невідновлюваних функціональних пристроїв радіоелектронної системи літака висвітлено у роботі [14].

У дослідженні [2] запропоновано порядок визначення гранично допустимих індикативних рівнів показників безвідмовності вертольотів на основі інформації про технічний стан в процесі їхньої технічної експлуатації. Також запропоновано комплексний підхід аналізу надійності на основі існуючих стандартів.

У роботі [15] розглянуто практичний аспект розв'язання проблеми розроблення ефективного методу розрахунку показників надійності відновлюваних технічних об'єктів.

У роботі [6] доведено, що похибки теоретичної моделі можуть мати великі значення і змарнувати результати оптимізаційних задач.

Зворотній розподіл Гаусса вперше був представлений Королівському статистичному товариству та описаний в оглядовій статті Фолкса та Чхікари (1978), що наголошувало на передових дослідженнях на цю тему, стимулювало використання цього розподілу в багатьох напрямках прикладних досліджень та рекомендувалося для моделювання та аналізу асиметричних даних [16].

Властивості DM розподілу викладені у роботах [7, 11], де також обґрунтована фізична сутність математичної моделі технічного обслуговування виробів за технічним станом.

Рекомендації щодо застосовувати DM-розподілу для механічних виробів визначені Державними стандартами України [3, 17]. У стандарті [17] розглянуто усі основні процеси деградації та наведено узагальнені характеристики законів розподілів випадкових величин. Стандарт [3] дозволяє прогнозувати показники надійності об'єктів в умовах малої або навіть відсутності статистики відмов за рахунок використання апріорної інформації про фізичні процеси деградації об'єктів.

У напрямку імітаційного моделювання добре відомі праці Шеннона Р., Шрайбера Д., Клейнена Д., Прицкера А. Також слід відзначити монографії, які широко використовуються в навчальному процесі багатьох університетів: А.М. Law, W.D. Kelton – Simulation Modeling and Analysis; J. Banks, J.S. Carson, B.L. Nelson – Discrete Event System Simulation.

Імітаційному моделюванню механічних статичних та динамічних систем присвячена робота [18]. Вдале поєднання в одному виданні базових

теоретичних засад комп'ютерного моделювання, обчислювальних експериментів, практичних засобів комп'ютерного моделювання здійснено у дослідженні [12].

В іноземному виданні [19] зазначено, що багато дослідників приділяли увагу питанням визначення довірчих інтервалів для змінних законів розподілу випадкових величин. Такі вчені, як Tian, Verrill, Johnson, Behboodan, Jafari, використовували концепцію узагальнених значень довірчих інтервалів коефіцієнту варіації на основі відношення правдоподібності кількох нормальних розподілів випадкових величин. Коефіцієнт варіації розподілу відмов вважається узагальненою характеристикою, яка визначає вид та форму розподілу.

У роботі [6] розглянуто чотири схеми формалізації ймовірно-фізичних моделей відмов, а саме:

випадковий процес, якому відповідає альфа-розподіл;

гауссовський процес, якому відповідає нормальний параметричний розподіл;

неперервний марковський процес із монотонними реалізаціями, якому відповідає DM розподіл;

неперервний марковський процес із немонотонними реалізаціями, якому відповідає DN розподіл.

## Результати

В умовах ведення російсько-української війни основні типи військової АТ в основному підійшли до того етапу свого життєвого циклу, коли на їх надійність суттєво починають впливати такі чинники, як фізичний знос і природне старіння. У процесі технічної експлуатації АТ будь-які події відбуваються випадковим чином, і інтервали часу до настання події (між подіями) являють собою випадкові тривалості перебування об'єкта у певних станах, статистичне розсіювання яких обумовлюється неоднорідністю структури матеріалів, випадковою різницею структури, хімічного складу та інших властивостей між елементами, випадковим навантаженням АТ під час експлуатації [17]. Тому припущення про однорідність відмов всіх складових систем та елементів не є достатньо прийнятним через різний вплив характеру їх відмов на безпеку польотів та бойову ефективність АТ. Специфіка технічної експлуатації АТ потребує у деяких випадках особливого підходу і спеціальних методів аналізу показників надійності. Одними із важливих завдань у технічному аспекті в теорії надійності є встановлення закономірностей виникнення відмов, прогнозування відмов, а також знаходження способів підтримання надійності у процесі технічної експлуатації АТ [7].

Для переходу на експлуатацію АТ за станом необхідно проводити аналіз статистики випадкових процесів, а для цього необхідно мати справу з багатовимірними розподілами [20].

Вичерпною характеристикою будь-якої випадкової величини є ймовірнісний розподіл цієї

величини чи функція розподілу. Незалежно від складності об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу наробітку (модель відмов), а вся проблема оцінювання показників надійності об'єкта зводиться до оцінювання параметрів цього розподілу [17].

Порівняльний аналіз моделей відмов, що зазначені у [17], показує, що за всіма вимогами (фізичністю, адекватністю, можливістю розрахунку показників надійності, універсальністю та практичною придатністю), які висуваються до моделей відмов, дифузійні розподіли мають перевагу перед рештою моделей (Вейбулла, логарифмічно-нормальним, експоненціальним,  $\alpha$ -розподілом) [7].

Вибір моделі відмов, тобто визначення аналітичного виразу функції розподілу проводять на підставі аналізу:

статистичних даних наробітків до відмови або ресурсу;

фізичних процесів деградації, які спричиняють відмову (граничний стан) [17].

Оскільки сукупність показників надійності елемента залежить від моделі надійності системи, в яку входить елемент, і від типу нормованого показника надійності, то в деяких випадках не потрібне знання функції розподілу. Достатньо знати деякі числові характеристики: середній наробіток до відмови, ймовірність відмови за заданий час тощо [7].

Для прогнозування технічного стану АТ необхідно створити математичну модель, яку можна представити аналітичними виразами одного з показників:

ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ ;

щільність ймовірності  $f(t)$ ;

інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ .

Вигляд аналітичної функції, яка описує зміну показників надійності  $P(t)$ ,  $f(t)$  або  $\lambda(t)$ , характеризує закон розподілу випадкової величини, що залежить від властивостей об'єкта, умов його роботи та характеру відмов [7, 21].

Інтенсивність відмов більш повно характеризує безвідмовність об'єкта на момент наробітку  $t$ , ніж щільність розподілу відмов, оскільки показує частоту відмов, віднесену до фактичної працездатної кількості об'єктів на момент наробітку  $t$ . Інтенсивність відмов, як кожний показник безвідмовності, має статистичне та ймовірнісне визначення [7].

У багатьох роботах з надійності інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  визначається як миттєва умовна щільність ймовірності відмов.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (1)$$

Зростання  $\lambda(t)$  належить до періоду старіння об'єкта і викликане збільшенням кількості відмов від зношування, спрацьовування, старіння та інших причин, пов'язаних із тривалою технічною експлуатацією.

Для раціонального підходу до вибору розподілу випадкової величини для об'єктів механічного типу введемо у формулу (1) дифузійний закон розподілу [7].

Через велику громіздкість інтегральних виразів для практичного розрахунку показників надійності обчислення інтегралів замінюють використанням таблиць. Крім того, для використання одних і тих самих уніфікованих таблиць для всіх нормально розподілених випадкових величин проводять нормування. Із цією метою нормують змінну величину і переходять від випадкової величини  $T=\{t\}$  до деякої випадкової величини  $X=\{x\}$ , яка розподілена нормально з параметрами  $M\{X\}=0$ , середньоквадратичним відхиленням  $S\{X\}=1$  і щільністю розподілу.

Для побудови моделей неперервних процесів або перетворення одержаних дискретних значень використовуються різноманітні дискретні перетворення, зокрема дискретне перетворення Лапласа [5, 18].

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad (2)$$

Оскільки нормована функція  $f(x)$  симетрична відносно осі ординат, у практичних розрахунках часто використовують функцію Лапласа як розподіл додатних значень випадкової величини  $X$  у вигляді (3) [7].

$$\Phi_0(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (3)$$

де  $\Phi_0$  – функція нормованого нормального розподілу [3].

Функція Лапласа  $\Phi_0$  – це табульована функція розподілу нормованої та центрованої випадкової величини  $x$ . При моделюванні випадкової величини з усіченим нормальним розподілом, з достатньою для практики точністю можна уникнути розрахунків за формулами [1, 3, 22].

Зазначимо, що наробіток до відмови (на відмову) завжди додатний, а крива щільності розподілу  $f(t)$  у загальному випадку починається від  $t = -\infty$  і поширюється до  $t = \infty$ . У разі великого розкиду значень випадкової величини  $T$  область можливих значень обмежується ділянкою  $(0, \infty)$  і тоді використовують усічений нормальний розподіл, отриманий із класичного нормального з обмеженням інтервалу можливих значень наробітку до відмови (на відмову). Функцію усіченого нормального розподілу можна використовувати для апроксимації реальних розподілів на ділянці старіння [7].

Тип розподілу визначається характером фізичного процесу деградації, зокрема, детермінованим, монотонним чи немонотонним видом його реалізацій. Залежно від виду реалізації процесу деградації отримують відповідно DM розподіл чи дифузійно-немонотонний (DN) розподіл наробітку до відмови [17].

Процес деградації механічних об'єктів внаслідок необоротності процесів руйнування прийнято розглядати як процес з монотонними реалізаціями.

DM розподіл відмов відомий у світовій практиці під назвою “Розподіл Бірнбаума-Сандерса” [17]. Цей розподіл також відомий як розподіл довговічності від втоми, має правий перекив і використовується для моделювання часу відмови промислових компонентів. Багато увагу приділено цьому розподілу завдяки його привабливим властивостям і зв'язків з нормальним розподілом (що є симетричним). Насправді оригінальна ідея розподілу Бірнбаума-Сандерса полягає в дослідженні вібрації в комерційних літаках, які викликають втому матеріалу під змінним навантаженням і напругою [19].

Використання двохпараметричних дифузійних розподілів, призводить до підвищення точності оцінок показників надійності технічних систем та істотне скорочення об'єму випробувань або об'єму спостережень [3].

*Параметри дифузійних розподілів:*

*Параметр масштабу*, що характеризує розташування розподілу на часовій осі [3]. Параметр масштабу  $\mu$  дорівнює величині, зворотній середній швидкості зміни визначального параметра (нормованого на граничне значення).

*Параметр форми* характеризує вид і форму розподілу [3]. Параметр форми  $\nu$  дорівнює коефіцієнту варіації швидкості змінювання визначального параметра [6, 7, 11, 17].

Коефіцієнт варіації розподілу відмов є узагальноною оцінкою параметра ряду розподілів. Якщо встановлено основні фізичні процеси деградації (види руйнування) об'єктів, то числове значення коефіцієнта варіації розподілу відмов визначають за стандартом [17].

У процесі прогнозування найважливішою апріорною інформацією, яка дозволяє ефективно вирішувати завдання, є оцінка коефіцієнта варіації розподілу наробітку до відмови (на відмову), до граничного стану. Коефіцієнт варіації розподілу відмов практично співпадає з коефіцієнтом варіації процесу деградації (змінювання визначального параметра). Це дає можливість оцінити коефіцієнт варіації розподілу відмов шляхом використання численної інформації про фізичні процеси деградації, які спричиняють відмови об'єктів [17]. Коефіцієнт варіації є важливою описовою статистикою для аналізу мінливості даних. Зокрема, це міра мінливості відносно середнього значення [19].

Якщо з високою вірогідністю встановлено, що відмови спричинені незворотними процесами типу механічне зношення, втоми та корозія, то як теоретичну модель відмов слід прийняти DM розподіл.

Слід враховувати, що за однакових оцінок основних статистичних характеристик деградаційного процесу, що приймаються як оцінки параметрів дифузійних розподілів, DN розподіл має менш оптимістичні оцінки показників

надійності у порівнянні з DM розподілом внаслідок урахування елемента випадковості [17].

Основні характеристики для DM розподілу визначаються як [7]:

*Щільність ймовірності.*

$$f(t) = \frac{t + \mu}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}}, \quad (4)$$

де  $\mu, v$  – оцінки параметрів дифузійних розподілів ( $\mu$  – параметр масштабу,  $v$  – коефіцієнт варіації) [3].

Якщо встановлені переважаючі процеси руйнування й їх доля (відсотки) у формуванні відмов, то очікуване середнє значення коефіцієнта варіації визначають по формулі:

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}}, \quad (5)$$

де  $v_i$  – середнє значення коефіцієнта варіації;  
 $p_i$  – вклад  $i$ -го процесу руйнування (об'ємна втома, контактна втома, механічний знос тощо,  $i = 1, 2, \dots, k$ ). При цьому  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$  [13].

Коефіцієнт варіації, як узагальнена характеристика, з достатньою для інженерної практики точністю може бути оцінена на підставі численних досліджень як процесу руйнувань, так і на підставі статистичних даних про відмови при випробуваннях і експлуатації виробів-аналогів [6].

У стандарті [17] зазначено, що на підставі результатів випробувань і експлуатації аналогів механічного, електромеханічного, тепломеханічного устаткування коефіцієнти варіації мають значення 0,3–0,9. Процеси втоми, як встановлено, мають коефіцієнти варіації порядку 0,4–0,8. Якщо немає конкретних уточнювальних даних, значення коефіцієнтів варіації обираються з табличних даних [3 17]. Відповідно до стандарту [17] для механічних виробів, які підпорядковані DM розподілу, коефіцієнт варіації  $v = 0,5$  [11].

*Функція розподілу.*

$$F(t) = DM(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right), \quad (6)$$

де  $\mu, v$  – оцінки параметрів дифузійних розподілів.

Функція розподілу повинна дозволити виконувати розрахунок показників надійності систем на підставі відомих показників надійності їхніх складових частин [17].

*Ймовірність безвідмовної роботи.*

Для порівняння ефективності технічної експлуатації виробів АТ при різних моделях відмов необхідно визначити функцію розподілу часу безвідмовної роботи. Для DM розподілу така функція знаходиться за формулою (7).

При  $v = 0,5$  для механічних виробів, математичне сподівання напрацювання на відмову практично співпадає з коефіцієнтом масштабу [11].

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right), \quad (7)$$

де  $\mu, v$  – оцінки параметрів дифузійних розподілів.

*Інтенсивність відмов.*

Функція інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  являє собою узагальнену характеристику розподілу, яка має інформацію одразу про дві функції – це  $f(t)$  та  $F(t)$ . Інтенсивність відмов об'єкта через табличні значення  $f(t)$  та  $F(t)$  знаходять за формулами (8, 9) [7, 17].

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{[1 - F(t)]}, \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \frac{(\mu + t) \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}}}{2vt\sqrt{2\pi\mu t} \cdot \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right)}, \quad (9)$$

Функції розподілу  $F(t)$ , які являють собою інтегральні характеристики, для будь-яких законів розподілу монотонні, що приховує особливості законів розподілу. Більш повно характеризує різні властивості розподілу (розміщення області можливих значень на осі часу, наявність і розширення найбільш ймовірних значень, ступінь розсіювання та симетричності тощо) щільність розподілу ймовірності  $f(t)$ . Саме завдяки цим якостям функцію  $f(t)$  найчастіше використовують для графічного зображення того чи іншого закону розподілу [7, 17]. Але  $\lambda(t)$  найбільш повно характеризує закон розподілу, ніж  $f(t)$ . Відомо, що закономірності функції  $\lambda(t)$  суттєво відрізняються у ряді законів, хоча деякі мають схожі функції  $f(t)$  і  $F(t)$ . Так, із стандарту [17] можна побачити, що крива щільності розподілу для DM розподілу є позитивно асиметричною, а інтенсивність відмов прямує до деякої константи. У зв'язку з цією властивістю інтенсивність відмов є одним із найважливіших критеріїв під час вибору теоретичної моделі розподілу відмов [7].

Параметри DM розподілу можуть бути оцінені як на підставі статистики відмов, на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які спричиняють відмови, а також на підставі сумісного використання статистичної інформації обох згаданих варіантів [7, 17].

Для адекватного відображення процесів зміни технічного стану АТ, представлених в логіко-математичній формі, необхідно використовувати імітаційне моделювання [12, 23].

Для організації сучасного процесу математичного моделювання використовуються різноманітні інструментальні програмні засоби та середовища – MathCAD, Matlab, Wolfram Mathematica, Maple, PTV Vissim тощо [10]. Для імітаційного моделювання використовують GPSS World, Rockwell Arena, AnyLogic, Powersim Studio

10, iTHINK 10.0, ExtendSim, Vensim, Matlab Simulink.

Під час дослідження системи технічної експлуатації АТ та проведення обчислювальних математичних задач застосовано програму Matlab з широким класом предметно-орієнтованих бібліотек (toolbox) та інструментом візуального моделювання Simulink. Починаючи з версії R2017b у Matlab/ Simulink з'явилася можливість реалізувати імітаційне моделювання більше наближене до реального [24].

Логіку спостереження за реальною системою перенесено з реального часу поведінки системи в модельний час [22]. Представимо аналітичний вираз (9) у вигляді моделі для Simulink (рис.1).

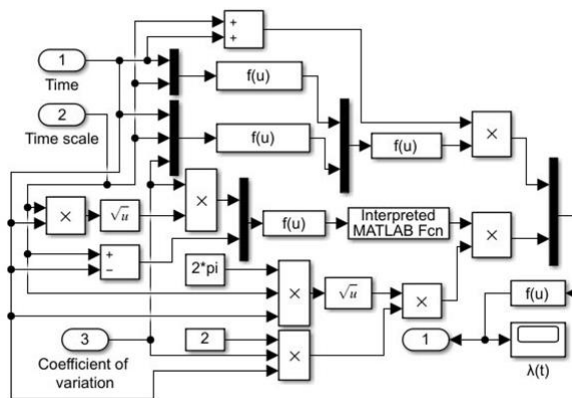


Рисунок 1 – Блок моделювання відмов для DM розподілу

Блок Interpreted MATLAB Fcn імітує випадкові числа відповідно до заданого закону розподілу. У блоці здійснюється перетворення функції Лапласа (3) із застосуванням функцій normcdf.

Для реалізації аналітичного виразу (9) в Simulink використовуються блоки Product (множення) та Sum (сума)

У теорії ймовірностей відомо декілька десятків двопараметричних функцій розподілу, які здатні достатньо добре описувати експериментальні дані відмов. Але не менш важливими є інші вимоги (фізичність, можливість виконання розрахунку показників надійності тощо), які і звужують коло функцій розподілів, що використовуються як моделі відмов [17].

Для того щоб скористатися результатами розрахунків, їх необхідно представити у зручній для сприйняття формі. Для наочної ілюстрації результати моделювання системи представлено у вигляді графіків [25].

Імовірно-фізичну модель (DM розподіл) спеціально побудовано для опису відмов об'єктів на підставі аналізу фізичних процесів деградації, які спричиняють відмови і, на відміну від ймовірнісних моделей, така модель є фізично обґрунтованою, що враховує фізичну природу відмов та дає можливість використовувати характеристики фізичних явищ, які відбуваються в об'єкті [17, 6]. Фізичні процеси розглядаються як випадкові, при цьому виникає зв'язок між значеннями ймовірності відмови і фізичними параметрами, що викликають відмову.

Результати моделювання інтенсивності відмов при різних значеннях параметру масштабу та коефіцієнту варіації представлено на рис. 2–5.

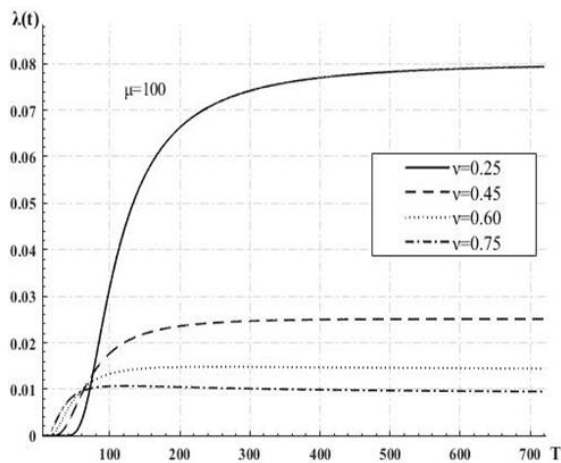
### Обговорення

Аналіз отриманих залежностей свідчить, що інтенсивність відмов DM розподілу має немонотонний характер, в асимптоті ( $t \rightarrow \infty$ ) прагне до константи. DM розподіл має позитивну асиметрію. Незважаючи на помітно асиметричний вид (при значеннях параметра форми чи коефіцієнту варіації розподілу більше 0,3) [17, 7].

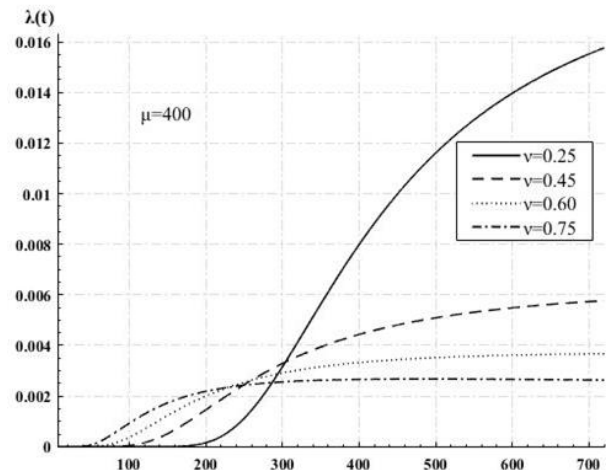
На основі вирівнювання значної кількості даних відмов найрізноманітніших об'єктів визначено, що дифузійні розподіли є більш гнучкими функціями, що краще вирівнюють дослідні дані порівняно з відомими двопараметричними строго ймовірнісними моделями (Вейбула, логарифмічно-нормальним, гамма-розподілом, нормальним параметричним і  $\alpha$ -розподілом) [6]. Параметри дифузійних розподілів надійності можуть бути оцінені як на основі статистики відмов, так і на основі аналізу статистичних характеристик фізичного процесу, що призводить до відмови. Тому дифузійні розподіли є більш адекватними моделями відмов [6, 7].

Застосунок Simulink дозволяє досить швидко змоделювати систему та отримати показники очікуваного ефекту [22]. Сутність імітаційного моделювання полягає у пошуку кількісних і якісних результатів. У процесі побудови математичних моделей та під час їх дослідження можна провести аналіз і зрозуміти характеристики процесу, що досліджується [10]. На підставі аналізу результатів моделювання приймається рішення про те, за яких умов система буде функціонувати із найбільшою ефективністю [22].

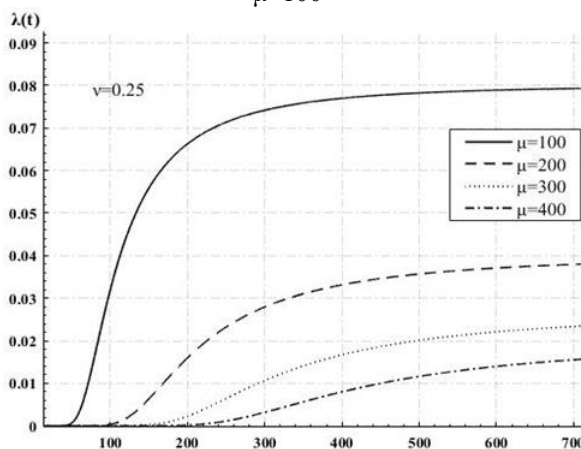
Розроблена модель може використовуватися як для проведення практичних розрахунків, так і для перевірки коректності аналітичних методів розрахунку [8].



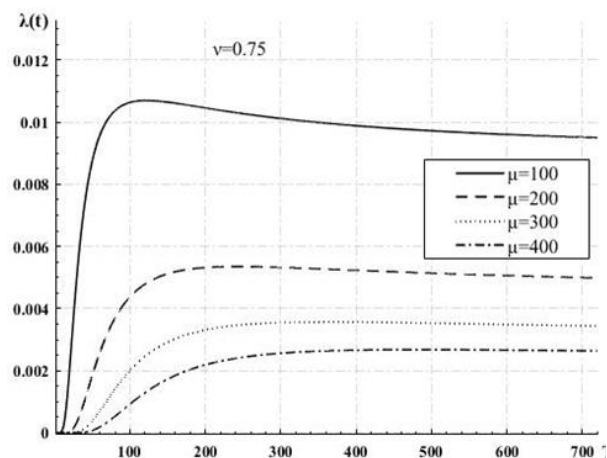
**Рисунок 2** – Залежність інтенсивності відмов від коефіцієнту варіації для DM-розподілу при  $\mu=100$



**Рисунок 3** – Залежність інтенсивності відмов від коефіцієнту варіації для DM-розподілу при  $\mu=400$



**Рисунок 4** – Залежність інтенсивності відмов від масштабу часу для DM-розподілу при  $\nu=0.25$



**Рисунок 5** – Залежність інтенсивності відмов від масштабу часу для DM-розподілу при  $\nu=0.75$

### Висновки

У статті представлено результати імітаційного моделювання на основі запропонованої математичної моделі інтенсивності відмов агрегатів авіаційної техніки механічного типу, які свідчать про досягнення мети дослідження.

Під час дослідження визначено, що інтенсивність відмов має великий вплив на основні показники надійності. Разом з тим із переходом на експлуатацію АТ за станом, на показники її надійності суттєво починають впливати ще такі чинники, як фізичний знос і природне старіння.

Математичну модель представлено аналітичним виразом показника  $\lambda(t)$ , який перетворено у кількісну характеристику функції дифузійно-монотонного закону розподілу випадкової величини, що дає можливість використовувати її у подальших дослідженнях для прогнозування технічного стану АТ, як об'єкту, якому притаманні процеси механічного зношування, корозії, втоми, старіння.

Завдяки властивостям Simulink вирішено завдання створення імітаційної моделі прогнозування інтенсивності відмов АТ, побудованої за блочно-модульним принципом. Для

наочної ілюстрації результати моделювання у статті представлено у вигляді графіків.

Доведено, що дифузійні закони розподілу випадкових величин по ряду вимог перевершують існуючі традиційні моделі надійності і є для них найбільш адекватними моделями відмов.

### Список використаних джерел

- [1.] С. В. Гаєвський, С. М. Балакірева, Д. В. Комаров та В. О. Явтушенко, "Аналіз радіоелектронної системи літака як об'єкта продовження терміну експлуатації," Системи управління, навігації та зв'язку, № 1(59), с. 15–20, 2020. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.015>.
- [2.] В. М. Голуб та ін., "Оцінка впливу функціональних систем вертольотів Мі-8МСБ-В та Ми-8МТ(МТВ) на показники їх безвідмовності за 2017 - 2021 роки," Збірник наукових праць ДНДІ ВіС ОБТ, № 1(11), с. 29–37, 2022. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.04>.
- [3.] Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов, ДСТУ 8647:2016. Київ, Україна: ДП "УкрНДНЦ", 2015.
- [4.] І. Є. Сафонов та І. П. Коровін, "Підхід до

- вдосконалення системи впровадження досвіду технічної експлуатації повітряних суден державної авіації України та створення надійної системи підтримання їхньої льотної придатності за стандартами НАТО," *Наука і оборона*, № 3, с. 19–25, 2025, <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2025-30-3-19-26>.
- [5.] В. В. Вичужанін та М. Д. Рудніченко, *Методи інформаційних технологій у діагностиці стану складних технічних систем: монографія*. Одеса, Україна: Екологія, 2019.
- [6.] А. М. Петренко, "Дифузійно-немонотонний розподіл часу безвідмовної роботи як найбільш адекватний закон для електричних установок," *Вісник Черкаського ДТУ*, № 2, с. 77–83, 2013.
- [7.] О. М. Нечипоренко, *Основи надійності літальних апаратів: навч. посіб.* Київ, Україна: НТУУ КПІ, 2010.
- [8.] W. Xie, Y. Hong, and K. Trivedi, "Analysis of a two-level software rejuvenation policy," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 87, pp. 13–22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.res.2004.02.011>
- [9.] S. Krivel, "Simulink-based analysis of the structural reliability scheme of technical systems," *Information Science, Computer Engineering and Management. Proceedings of ISTU*, vol. 22, no. 6, pp. 85–97, 2018. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-85-97>.
- [10.] Н. В. Богданова та О. В. Богданов, *Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб.* Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
- [11.] В. І. Мірненко, С. О. Пустовий, П. М. Яблонський та О. В. Авраменко, "Порівняння ефективності технічного обслуговування виробів авіаційної техніки, що експлуатуються за технічним станом, для моделей дифузійно-монотонного і дифузійно-немонотонного розподілів відмов," *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 2(23), с. 88–93, 2015. [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2\(23\)-88-93](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2(23)-88-93)
- [12.] І. В. Кравченко, В. І. Микитенко та Г. С. Тимчик, *Комп'ютерне моделювання: системи і процеси: підручник*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
- [13.] О. Г. Boyko, "About legitimacy of usage of agreed probabilities of failure-free work and agreed breakdowns probabilities," *Aviation and Rocket and Space Technology*, pp. 113–116, 2010.
- [14.] С. В. Гасвський та ін., "Математичні моделі для розрахунку показників залишкового ресурсу невідновлювальних комплектуючих виробів радіоелектронної системи літака," *Системи управління, навігації та зв'язку*, № 3(61), с. 49–52, 2020. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.049>.
- [15.] О. Ю. Лозинський та С. В. Щербовських, "Розрахунок параметра потоку відмов відновлюваного об'єкта з урахуванням тривалості ремонтів," *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*, № 9, с. 92–99, 2009. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000116670>
- [16.] G. S. Mudholkar and R. Natarajan, "The inverse Gaussian models: Analogues of symmetry, skewness and kurtosis," *The Institute of Statistical Mathematics*, vol. 54, no. 1, pp. 138–154, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016173923461>
- [17.] *Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення*, ДСТУ 3433-96. Київ, Україна: ДП "УкрНДНЦ", 1998.
- [18.] В. Б. Струтинський, *Математичне моделювання процесів та систем механіки: підручник*. Житомир, Україна: ЖІТІ, 2001.
- [19.] W. Puggard, S.-A. Niwitpong, and S. Niwitpong, "Confidence intervals for common coefficient of variation of several Birnbaum–Saunders distributions," *Symmetry*, vol. 14, no. 10, p. 2101, 2022. <https://doi.org/10.3390/sym14102101>.
- [20.] И. А. Мачалин, Г. Ф. Конахович та О. П. Ткалич, "Аппроксимация одного класса случайных процессов в задачах контроля радиоэлектронных систем," у *Материалы IV междунар. научно-техн. конф. «АВИА-2002»*, Київ, Україна, 2002, с. 67–69.
- [21.] В. С. Корольок, *Стохастические модели систем*. Київ, Україна: Наукова думка, 1989.
- [22.] А. М. Лоу та В. Д. Кельтон, *Имитационное моделирование*. Санкт-Петербург, росія; Київ, Україна: ВНУ, 2004.
- [23.] А. В. Сохацький, *Моделювання в транспортних технологіях: монографія, ч. 1*. Дніпро, Україна: УМСФ, 2022.
- [24.] P. A. Shakouri, "Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab," *Faculty of Engineering, Kingston University, London, U.K.*, 2015.
- [25.] Н. Клименко та ін., *Моделювання економіки: навчальний посібник*. Київ, Україна: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України, 2022.

Ihor Safonov (PhD)

<https://orcid.org/0000-0001-5717-2813>

Ivan Korovin (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-4645-9688>

National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## MODELING THE BEHAVIOR OF THE FAILURE INTENSITY FUNCTION OF MECHANICAL TYPE AVIATION EQUIPMENT USING THE DIFFUSION-MONOTONE DISTRIBUTION LAW OF RANDOM VARIABLES

*The random nature of failures in aircraft systems and the inability to predict some emergency situations lead to the loss of considerable time to identify the causes of their occurrence. Recently, to predict the technical condition of aircraft, researchers have successfully used probabilistic-physical reliability models that take into account physical degradation processes.*

*The article presents a simulation model based on the diffusion-monotonic law of failure distribution, which is considered promising in scientific research on degradation processes occurring in systems and units of aging aircraft. The parameters of the presented distribution can be determined based on the statistical characteristics of failures or based on the analysis of the physical process of failures, which gives a certain advantage over probabilistic models. Analysis of the behavior of the failure intensity function makes it possible to predict the technical condition of mechanical-type units in which changes in physical parameters of a monotonic nature occur.*

*To adequately reflect the behavior of the failure intensity function of mechanical-type units, simulation modeling using Simulink software is proposed. The simulation results are presented in the form of graphs.*

**Keywords:** *distribution function, failure model, technical condition prediction, simulation, aviation technology, reliability.*

### References

- [1.] S. V. Haievskiy, S. M. Balakirieva, D. V. Komarov, and V. O. Yavtushenko, "Analysis of the radio-electronic system of an aircraft as an object of service life extension," *Systems of Control, Navigation and Communication*, no. 1(59), pp. 15–20, 2020. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.015>. (in Ukrainian)
- [2.] V. M. Holub et al., "Assessment of the impact of functional systems of Mi-8MSB-V and Mi-8MT (MTV) helicopters on their reliability indicators for 2017–2021," *Collection of Scientific Works of the State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, no. 1(11), pp. 29–37, 2022. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.04>. (in Ukrainian)
- [3.] Reliability of Equipment. Estimation and Prediction of Reliability by the Results of Tests and (or) Operation in the Conditions of Small Failure Statistics, DSTU 8647:2016. Kyiv, Ukraine: SE "UkrNDNC", 2015. (in Ukrainian)
- [4.] I. Ye. Safonov and I. P. Korovin, "An approach to improving the system of implementing the experience of technical operation of state aviation aircraft of Ukraine and creating a reliable system for maintaining their airworthiness according to NATO standards," *Science and Defense*, no. 3, pp. 19–25, 2025. <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2025-30-3-19-26>. (in Ukrainian)
- [5.] V. V. Vychuzhanin and M. D. Rudnichenko, *Information Technology Methods in Diagnostics of the State of Complex Technical Systems: Monograph*. Odesa, Ukraine: Ekologia, 2019. (in Ukrainian)
- [6.] A. M. Petrenko, "Diffusion-nonmonotonic distribution of uptime as the most adequate law for electrical installations," *Visnyk of Cherkasy State Technological University*, no. 2, pp. 77–83, 2013. (in Ukrainian)
- [7.] O. M. Nechyporenko, *Fundamentals of Aircraft Reliability: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2010. (in Ukrainian)
- [8.] W. Xie, Y. Hong, and K. Trivedi, "Analysis of a two-level software rejuvenation policy," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 87, pp. 13–22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.res.2004.02.011>
- [9.] S. Krivel, "Simulink-based analysis of the structural reliability scheme of technical systems," *Information Science, Computer Engineering and Management. Proceedings of ISTU*, vol. 22, no. 6, pp. 85–97, 2018. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-85-97>
- [10.] N. V. Bohdanova and O. V. Bohdanov, *Mathematical Modeling of Systems and Processes: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. (in Ukrainian)
- [11.] V. I. Mirnenko, S. O. Pustoyvi, P. M. Yablonskyi, and O. V. Avramenko, "Comparison of the maintenance efficiency of aviation equipment items operated by technical condition for models of diffusion-monotonic and diffusion-nonmonotonic failure distributions," *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, no. 2(23), pp. 88–93, 2015. [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2\(23\)-88-93](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2(23)-88-93) (in Ukrainian)
- [12.] I. V. Kravchenko, V. I. Mykytenko, and H. S. Tymchyk, *Computer Modeling: Systems and Processes: Textbook*.

- Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. (in Ukrainian)
- [13.] O. G. Boyko, "About legitimacy of usage of agreed probabilities of failure-free work and agreed breakdowns probabilities," *Aviation and Rocket and Space Technology*, pp. 113–116, 2010.
- [14.] S. V. Haievskiy et al., "Mathematical models for calculating residual life indicators of non-recoverable component parts of the aircraft radio-electronic system," *Systems of Control, Navigation and Communication*, no. 3(61), pp. 49–52, 2020. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.049>. (in Ukrainian)
- [15.] O. Yu. Lozynskiy and S. V. Shcherbovskiykh, "Calculation of the failure flow parameter of a recoverable object taking into account the duration of repairs," *Physical and Mathematical Modeling and Information Technologies*, no. 9, pp. 92–99, 2009. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000116670> (in Ukrainian)
- [16.] G. S. Mudholkar and R. Natarajan, "The inverse Gaussian models: Analogues of symmetry, skewness and kurtosis," *The Institute of Statistical Mathematics*, vol. 54, no. 1, pp. 138–154, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016173923461>
- [17.] *Reliability of Equipment. Failure Models. Basic Principles*, DSTU 3433-96. Kyiv, Ukraine: SE "UkrNDNC", 1998. (in Ukrainian)
- [18.] V. B. Strutynskiy, *Mathematical Modeling of Processes and Systems of Mechanics: Textbook*. Zhytomyr, Ukraine: ZhITI, 2001. (in Ukrainian)
- [19.] W. Puggard, S.-A. Niwitpong, and S. Niwitpong, "Confidence intervals for common coefficient of variation of several Birnbaum–Saunders distributions," *Symmetry*, vol. 14, no. 10, p. 2101, 2022, <https://doi.org/10.3390/sym14102101>.
- [20.] I. A. Machalin, G. F. Konakhovich, and O. P. Tkalich, "Approximation of a class of random processes in problems of control of radio-electronic systems," in *Proc. 4th Int. Sci. Tech. Conf. AVIA-2002*, Kyiv, Ukraine, 2002, pp. 67–69. (in Russian)
- [21.] V. S. Korolyuk, *Stochastic Models of Systems*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 1989. (in Russian)
- [22.] A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*. St. Petersburg, Russia; Kyiv, Ukraine: BHV, 2004. (in Russian)
- [23.] A. V. Sokhatskiy, *Modeling in Transport Technologies: Monograph*, pt. 1. Dnipro, Ukraine: UMSF, 2022. (in Ukrainian)
- [24.] P. A. Shakouri, "Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab," *Faculty of Engineering, Kingston University, London, U.K.*, 2015.
- [25.] N. Klymenko et al., *Modeling of the Economy: Study Guide*. Kyiv, Ukraine: NUBiP of Ukraine, 2022. (in Ukrainian).

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-195-204**

**УДК 621.39:355.4**

**Білоус Олег Володимирович**

**<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>**

**Національний університет оборони України, Київ, Україна**

*Рукопис надійшов до редакції: 27.03.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 28.04.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## **УДОСКОНАЛЕНА СУКУПНІСТЬ ЧАСТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ MESH-МЕРЕЖ**

*У роботі проведено аналіз науково-методичних підходів до оцінювання ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення з використанням технології mesh-мереж. Встановлено, що відомі підходи недостатньо враховують особливості самоорганізованих мереж, зокрема просторову доступність і зв'язаність мережі в умовах динамічної зміни топології. Обґрунтовано удосконалену сукупність часткових показників, до складу якої включено показники доступності, зв'язаності та якості надання сервісів зв'язку, а також визначено логіку їх поєднання в узагальненому показнику ефективності функціонування системи.*

*Запропонована система часткових показників може бути використана для більш обґрунтованого оцінювання ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення, уточнення підходів до планування архітектури з використанням технології mesh-мереж, а також для вдосконалення оперативно-тактичних розрахунків у процесі організації зв'язку, особливо в умовах вогневого та радіоелектронного впливу противника.*

**Ключові слова:** система зв'язку; інформаційно-комунікаційна система; mesh-мережа; часткові показники; доступність мережі; зв'язаність мережі; якість надання сервісів зв'язку.

### **Вступ**

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування систем зв'язку військового призначення (СЗВП) в умовах сучасних бойових дій, яким притаманні висока динаміка зміни оперативної обстановки, вогневий вплив противника, радіоелектронне протиборство та постійна зміна топології мережі [1]. Досвід бойового застосування свідчить про обмеженість традиційних ієрархічних архітектур систем зв'язку та наявних методик оцінювання, орієнтованих на стаціонарні топології [2-13]. У дослідженні використано системний аналіз науково-методичних підходів, критичний аналіз існуючих моделей, а також методи математичної формалізації, геометричного опису та теорії графів. Встановлено, що відомі підходи недостатньо враховують стохастичну природу mesh-мереж, їх здатність до самовідновлення, реконфігурації маршрутів і збереження функціонування в умовах вогневого та радіоелектронного впливу.

У сучасних бойових діях СЗВП є одним із ключових елементів забезпечення стійкого управління військами, оскільки саме вона визначає можливість своєчасного обміну оперативно-тактичною інформацією в умовах вогневого ураження, радіоелектронного протиборства та високої динаміки зміни обстановки [14-17]. Аналіз досвіду ведення бойових дій у ході російсько-

української війни показує, що традиційна архітектура систем зв'язку, побудована на стаціонарних вузлах та ієрархічних радіонапрямках, виявляє критичну вразливість до ураження, демаскування та втрати окремих вузлів. Це зумовлює необхідність переходу до розподілених, високоманеврених і самоорганізованих мережевих рішень, зокрема на основі технології mesh-мереж [19-22].

Проблематика оцінювання ефективності функціонування СЗВП неодноразово розглядалася у працях, присвячених класичним підходам до оцінювання ефективності функціонування інформаційно-комунікаційних систем, телекомунікаційних мереж, від працездатності яких залежить виконання критично важливих функцій, а також безпосередньо СЗВП [2-4]. Проведений аналіз показав, що більшість відомих підходів виходили з припущення про відносну структурованість мережі та фіксованість маршрутів. Такі методики переважно розглядають параметри мережі як детерміновані величини і тому не враховують безперервної зміни топології, притаманної mesh-мережам. Значним кроком у розвитку науково-методичного апарату стала робота [13], у якій було обґрунтовано необхідність врахування показників якості надання сервісів зв'язку (англ. quality of service, QoS), зокрема пропускну спроможності, затримки, втрат пакетів і джитеру [24]. Водночас критичний аналіз цього підходу показав, що він має суттєві обмеження для

оцінювання ефективності функціонування СЗВП у сучасних умовах, оскільки орієнтується на фіксовані інформаційні напрямки, недостатньо враховує доступність сервісів в умовах деструктивного впливу противника і засобів радіоелектронної боротьби, а також допускає адитивне згортання показників, яке може маскувати критичні провали окремих параметрів.

Отже, проведене дослідження показало, що існуючі методики не забезпечують у повній мірі адекватного оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж. Між стохастичною природою самоорганізованих мереж і статичним характером наявних методик існує об'єктивна суперечність, подолання якої потребує удосконалення складу часткових показників оцінювання та їх узгодженого використання в межах єдиного підходу.

У цій статті під СЗВП розуміється сукупність сил, засобів і мережевих рішень, призначених для забезпечення обміну інформацією в інтересах управління військами, а під технологією mesh-мереж – самоорганізована мережева архітектура з динамічною маршрутизацією та можливістю реконфігурації зв'язків між вузлами [25, 26]. Гіпотеза дослідження полягає в тому, що адекватне оцінювання ефективності функціонування такої системи можливе лише за умови комплексного врахування трьох взаємопов'язаних аспектів: доступності мережі, її зв'язаності та QoS.

Метою статті є обґрунтування удосконаленої сукупності часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

### Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є функціонування СЗВП. Предметом дослідження є сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Методичну основу дослідження становили системний аналіз і критичний аналіз наявних науково-методичних підходів до оцінювання ефективності функціонування СЗВП, метод математичної формалізації, метод геометричного опису району функціонування мережі, графове подання топології mesh-мережі та нормалізація часткових показників у єдиній безрозмірній шкалі. Застосування зазначених методів було спрямоване на обґрунтування удосконаленої сукупності часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

На початковому етапі дослідження було проаналізовано відомі підходи до оцінювання ефективності функціонування СЗВП.

Фундаментальні основи оцінювання ефективності систем зв'язку та телекомунікаційних мереж були закладені у класичних працях. У ранніх моделях, представлених, зокрема, у монографії [2], системи

зв'язку розглядалися як відносно стаціонарні структури з наперед визначеною топологією та виділеними каналами передавання. Як часткові показники переважно використовували пропускну спроможність ( $\mu_{СЗ}$ ) та коефіцієнт стійкості ( $K_{стСЗ}$ ) системи, а узагальнений показник ефективності подавався у вигляді функціональної залежності:

$$Q = f(\mu_{СЗ}, K_{стСЗ}) \quad (1)$$

Така формалізація адекватно відображала реалії ієрархічних систем з комутацією каналів, де стійкість забезпечувалася структурним резервуванням, а топологія мережі залишалася незмінною протягом тривалого часу.

Розвиток методів дослідження операцій сприяв появі імовірнісних підходів. В окремих роботах, зокрема у дослідженнях [3] та [4], ефективність інтерпретувалася через часові параметри циклу управління. Узагальнений показник розглядався як імовірність того, що час доставки повідомлення не перевищить заданого оперативно-тактичними нормативами граничного значення:

$$Q = P(t \leq T_{зад}) \quad (2)$$

де  $t$  – час доставки повідомлення;  
 $T_{зад}$  – граничне значення часу доставки повідомлення задане оперативно-тактичними нормативами.

Цей підхід дозволив пов'язати технічні параметри зв'язку з оперативною ефективністю управління. Проте він, як правило, базувався на припущеннях про сталість потоків заявок та відсутність взаємозв'язку між відмовами елементів мережі, що є істотним спрощенням для умов вогневого ураження.

Подальше ускладнення завдань управління вимагало переходу до багатокритеріального оцінювання, що знайшло відображення у працях [5-8]. Автори [5, 8] запропонували відмовитися від єдиного скалярного показника на користь векторного показника, який дозволяє одночасно враховувати різні вимоги до СЗВП, таких як постійна готовність до забезпечення управління військами (силами), стійкість, мобільність, пропускну спроможність та розвідзахищеність [14]. Для зведення цих показників до єдиного узагальненого часто використовується метод адитивної згортки (зваженої суми):

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i q_i \quad (3)$$

де  $q_i$  – нормоване значення  $i$ -го часткового показника;

$a_i$  – ваговий коефіцієнт, що визначає пріоритетність цього показника для виконання бойового завдання.

У працях [6, 7] розглянуто просторову складову ефективності систем зв'язку. Зокрема, систему зв'язку цивільної інфраструктури подано, як розподілену систему, ефективність якої

залежить не лише від стану каналів, а й від топологічної зв'язаності вузлів на місцевості. Такий підхід є критично важливим для розуміння живучості мережі, проте класичні методи часто ігнорують високу динаміку змін цієї топології.

Проведений аналіз показав, що існуючі методики не забезпечують повною мірою адекватного оцінювання функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж, оскільки переважно орієнтовані на статичні топології та не враховують у достатній мірі стохастичний характер самоорганізованих мереж. Установлено, що розв'язання цієї суперечності потребує інтеграції показників доступності, зв'язності та якості надання сервісів зв'язку в межах єдиного підходу до оцінювання.

Як вихідне положення для подальшого дослідження використано відомий підхід, у якому ефективність функціонування окремого інформаційного напрямку описується через показники якості надання сервісів зв'язку [13], спираючись на рекомендації [24] та базові визначення військового зв'язку [15, 16. У межах цього підходу враховуються пропускна спроможність, середня затримка передавання даних, імовірність втрати пакетів і джитер, що дає змогу характеризувати функціональний аспект роботи мережі та створює основу для подальшого використання показника QoS у складі удосконаленої сукупності часткових показників.

$$Q_{\text{СЗВП}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\text{ІН}_i}}{n}, \quad (4)$$

де  $Q_{\text{СЗВП}}$  – коефіцієнт ефективності функціонування СЗВП;  
 $n$  – кількість інформаційних напрямків СЗВП;  
 $Q_{\text{ІН}_i}$  – ефективність функціонування  $i$ -го інформаційного напрямку.

Однак такий підхід є неприйнятним, оскільки не враховує ступеню важливості інформаційного напрямку. Зокрема, інформаційний напрямок із пунктом управління (ПУ) вищого рівня не може оцінюватися на одному рівні з інформаційним напрямком ПУ нижчого рівня. Втрата зв'язку з ПУ вищого рівня призводить до значно серйозніших наслідків, ніж у разі втрати зв'язку з менш важливим ПУ, що не приймають безпосередньої участі в операції (місії). Динамічний характер сучасних бойових дій (наприклад, під час масованого авіаційного нальоту) також вимагає оперативної зміни пріоритетів інформаційних напрямків зв'язку. Отже, показник ефективності, що усереднює всі напрямки (формула 4), не забезпечує адекватної оцінки роботи системи. Таким чином, виникла необхідність розподілу інформаційних напрямків за групами важливості [14].

До першої групи важливості (найвищий пріоритет) входять інформаційні напрями з ПУ: старшого штабу, військ першого ешелону, мобільного ешелону (при веденні маневреної

оборони), угруповання десантно-штурмових військ, угруповання ракетних військ і артилерії ЗС України, угруповання сил і засобів авіації ЗС України, угруповання сил і засобів протиповітряної оборони ЗС України, угруповання сил і засобів видів, родів військ (сил) ЗС України, угруповання спеціальних військ ЗС України.

До другої групи важливості (середній пріоритет) входять інформаційні напрями з ПУ: військ другого ешелону, резервів, сусідів, угруповання інших складових сил оборони, військових частин, підрозділів інших видів, родів, військ (сил) ЗС України, військових частин (підрозділів) угруповання спеціальних військ, які не ввійшли до першої групи важливості, ешелонів – ізоляції району конфлікту, пошуково-ударний, забезпечення охорони об'єктів та комунікацій, негайного реагування.

До третьої групи важливості (нижчий пріоритет) належать інформаційні напрями з ПУ: угруповання Сил логістики ЗС України, угруповання Медичних сил ЗС України, частин забезпечення та військових частин, підрозділів, установ, які не ввійшли до першої та другої груп важливості.

Враховуючи такий розподіл, автором [13] був запропонований узагальнений показник ефективності функціонування СЗВП:

$$Q_{\text{СЗВП}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Q_{\text{ІН}_i}^1 \cdot k_1}{n_1} + \frac{\sum_{i=1}^{n_2} Q_{\text{ІН}_i}^2 \cdot k_2}{n_2} + \frac{\sum_{i=1}^{n_3} Q_{\text{ІН}_i}^3 \cdot k_3}{n_3}, \quad (5)$$

де  $n_1$  – кількість інформаційних напрямків першої групи важливості;  
 $n_2$  – кількість інформаційних напрямків другої групи важливості;  
 $n_3$  – кількість інформаційних напрямків третьої групи важливості;  
 $Q_{\text{ІН}_i}^1$  – ефективність функціонування  $i$ -го інформаційного напрямку першої групи важливості;  
 $Q_{\text{ІН}_i}^2$  – ефективність функціонування  $i$ -го інформаційного напрямку другої групи важливості;  
 $Q_{\text{ІН}_i}^3$  – ефективність функціонування  $i$ -го інформаційного напрямку третьої групи важливості;  
 $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти важливості для першої групи, другої та третьої груп відповідно.

Такий підхід забезпечує системність оцінювання, коли кінцевий результат формується на основі зваженого врахування ефективності усіх інформаційних напрямків з урахуванням їхньої групи важливості. Це дозволяє моделювати вплив порушення зв'язку в окремих сегментах на загальну стійкість системи, а також прогнозувати рівень постійної готовності у разі зміни топології або бойових умов.

Одним із визначальних часткових показників, які входять до складу  $Q_{\text{ІН}_i}^1, Q_{\text{ІН}_i}^2, Q_{\text{ІН}_i}^3$  (формула 5), є  $K_{\text{QoS}}$ . Вона характеризує спроможність системи забезпечувати гарантований рівень своєчасної,

достовірної та безперервної передачі даних в інформаційних напрямках ПУ всіх груп важливості.

Для СЗВП показники QoS набувають особливого значення, оскільки відображає функціональну стійкість [27], здатність її підтримувати необхідну пропускну спроможність, забезпечувати допустимі затримки передачі даних, мінімізувати втрати пакетів та джитеру.

Згідно з [13], ефективність функціонування окремого інформаційного напрямку може бути представлена у вигляді функціональної залежності:

$$Q_{in_i} = f(C, T, P, J), \quad (6)$$

де  $C$  – пропускну спроможність;  
 $T$  – середня затримка передачі даних;  
 $P$  – імовірність втрати пакетів;  
 $J$  – джитер, що характеризує нестабільність часових параметрів передачі.

Така формалізація дозволяє інтегрувати технічні характеристики каналів у єдиний узагальнений показник, який не лише відображає технічний стан мережі, але й демонструє її функціональну стійкість. Під функціональною стійкістю розподілених інформаційних систем розуміється властивість системи зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, при впливі потоку експлуатаційних відмов, збоїв, пошкоджень, навмисної шкоди, втручання в обмін та обробку інформації, а також при помилках обслуговуючого персоналу [27]. Це створює основу для подальшого узгодженого використання показників QoS у складі комплексної моделі оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

Під час дослідження було прийнято, що для адекватного оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж необхідно одночасно враховувати три взаємодоповнювальні часткові показники: доступність мережі, її зв'язаність та QoS. Таке припущення ґрунтується на тому, що сам по собі показник QoS не відображає просторову доступність мережі, ані ступінь збереження її топологічної цілісності в умовах бойового застосування.

Для формалізації показника доступності район функціонування СЗВП задавався у вигляді еліптичної області. Площа цієї області використовувалася як базова характеристика району виконання завдань. У межах району розглядалася сукупність вузлів доступу, для кожного з яких задавалися координати розміщення та радіус упевненого покриття. Ефективна площа покриття визначалася як площа перетину району операції з об'єднанням усіх зон радіодоступу, а показник доступності – як відношення ефективної площі покриття до загальної площі району операції. Такий підхід дає змогу оцінити, яка

частина району бойових дій забезпечена стійким доступом до мережі зв'язку.

Для формалізації показника зв'язаності топологію mesh-мережі подано у вигляді графу, вершини якого відповідають базовим станціям і мобільним вузлам, а ребра – активним з'єднанням між ними. При цьому з'єднання між мобільними вузлами та між мобільними вузлами і базовими станціями задавалися окремо з урахуванням радіуса взаємодії мобільних вузлів і радіуса прямого доступу до базової станції. На відміну від класичних показників зв'язаності графа, запропонований показник зв'язаності враховує не лише факт досяжності базових станцій, а й кількість незалежних маршрутів доступу до них. Це дозволяє оцінити ступінь структурної інтегрованості мобільних вузлів у мережу та рівень резервування маршрутів у разі часткового ураження вузлів, руйнування окремих ліній зв'язку або зміни топології мережі.

Для забезпечення метричної сумірності всі три часткові показники – показник доступності, показник зв'язаності та показник якості надання сервісів зв'язку – було приведено до інтервалу  $[0;1]$ . Нормалізація забезпечує уніфікований підхід до подальшого зіставлення технічних, просторових і топологічних характеристик системи в єдиній метричній шкалі та створює підґрунтя для формування узгодженого підходу до побудови узагальненого показника ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

## Результати

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано удосконалену сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж. На відміну від підходів, що орієнтуються переважно на технічні характеристики окремих каналів або фіксованих інформаційних напрямків, запропонована сукупність показників включає три взаємодоповнювальні часткові показники: показник доступності, показник зв'язаності та показник QoS.

До удосконаленої сукупності часткових показників включено показник QoS. Він характеризує функціональний аспект роботи системи зв'язку та відображає її здатність забезпечувати необхідну пропускну спроможність, допустиму затримку передавання даних, прийнятний рівень втрат пакетів і джитеру. Використання цього показника як базового дозволило зберегти наступність із наявними підходами до оцінювання ефективності функціонування інформаційних напрямків.

У межах удосконалення сукупності часткових показників введено показник доступності мережі, який характеризує частку площі району виконання завдань, у межах якої забезпечується доступ до ресурсів mesh-мережі, та визначається за формулою:

$$K_{\text{дост}} = \frac{S_{\text{еф}}}{S_{\Omega}}, \quad (7)$$

де  $S_{\text{еф}}$  – ефективна площа покриття району операції мережею, км<sup>2</sup>;  
 $S_{\Omega}$  – площа району операції, км<sup>2</sup>;

На відміну від традиційних показників технічної надійності, цей показник відображає не стан окремого вузла в часі, а просторову можливість користувачів отримати доступ до сервісів зв'язку в межах заданого району бойових дій. Таким чином, показник доступності дозволяє кількісно врахувати просторовий аспект структурної стійкості системи.

Крім того, удосконалену сукупність часткових показників доповнено показником зв'язаності мережі, який характеризує ступінь структурної інтегрованості мобільних вузлів у мережу та рівень резервованості маршрутів доступу до базових станцій. Показник зв'язаності визначається як середнє нормоване значення зв'язаності для всіх пар вузлів графа:

$$K_{\text{зв}} = \frac{2}{T(T-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_{ij}, \quad 0 \leq K_{\text{зв}} \leq 1, \quad (8)$$

де  $K_{\text{зв}}$  – коефіцієнт зв'язаності мережі;  
 $N$  – кількість вузлів мережі;  
 $c_{ij}$  – це нормований показник зв'язаності між вузлами  $i$  та  $j$ .

Нормований показник зв'язаності вузлів відображає ступінь резервованості маршрутів між ними: значення 0 відповідає відсутності зв'язку, значення 1/3 – наявності одного маршруту, значення 2/3 – двох незалежних маршрутів, а значення 1 – трьом і більше незалежним маршрутам, що приймаються як нормативно достатній рівень резервування, за якого зв'язок між вузлами вважається достатньо стійким до одиничних і частково кратних порушень структури мережі. При  $K_{\text{зв}} = 0$  мережа є повністю фрагментованою й не забезпечує інформаційної взаємодії між вузлами, а значення  $K_{\text{зв}} = 1$  відповідає стану, за якого між будь-якою парою вузлів існує не менше трьох незалежних маршрутів. Таким чином, показник  $K_{\text{зв}}$  комплексно враховує як наявність зв'язку між вузлами, так і його резервованість, а отже є більш адекватним для оцінювання структурної стійкості mesh-мережі, ніж прості бінарні характеристики досяжності.

На відміну від класичних показників зв'язності графа, запропонований показник враховує не лише сам факт досяжності, а й кількість незалежних маршрутів доступу до базових станцій. Це дає змогу більш адекватно відобразити стійкість mesh-мережі до втрати окремих вузлів, руйнування ліній зв'язку та змін топології в умовах бойового застосування.

Установлено, що кожен із трьох часткових показників виконує окрему, але взаємопов'язану

роль в оцінюванні ефективності функціонування СЗВП. Показник доступності характеризує переважно просторову основу структурної стійкості мережі, показник зв'язаності – її топологічну цілісність і резервованість маршрутів, а показник QoS – функціональну стійкість системи під час передавання даних. Спільне використання цих показників дає змогу перейти від локального оцінювання окремих каналів або напрямків до комплексного оцінювання реальної боєздатності системи зв'язку.

Для зручності оцінювання всі три часткові показники було приведені до єдиної безрозмірної шкали в інтервалі [0;1]. Це забезпечує їхню метричну сумірність і створює можливість подальшого узгодженого використання в межах єдиного підходу до оцінювання ефективності функціонування системи.

Таким чином, за результатами дослідження сформульовано загальну функціональну залежність узагальненого показника ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж:

$$E_{\text{mesh}} = f(K_{\text{дост}}, K_{\text{зв}}, K_{\text{QoS}}). \quad (9)$$

Ця залежність відображає логіку спільного врахування показника доступності, показника зв'язаності та показника QoS як трьох базових складових оцінювання. Отриманий результат створює підґрунтя для подальшого аналітичного виведення математичної моделі та розроблення методики оцінювання ефективності функціонування системи на наступних етапах дослідження.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що удосконалена сукупність часткових показників може бути використана під час кількісного оцінювання ефективності функціонування СЗВП, обґрунтування рішень щодо побудови архітектури mesh-мереж, а також удосконалення оперативно-тактичних розрахунків при плануванні організації зв'язку в бойових умовах. Взаємозв'язок часткових показників, їх змістовна характеристика та приналежність до відповідних властивостей стійкості системи наведені в табл. 1.

Удосконалена сукупність часткових показників формується трьома базовими компонентами – показником доступності, показником зв'язаності та показником якості надання сервісів зв'язку. У цій структурі показник доступності визначає просторову основу структурної стійкості системи, показник якості надання сервісів зв'язку відображає її функціональну стійкість, а показник зв'язаності є зв'язувальною ланкою, яка в поєднанні з показником доступності характеризує структурну стійкість, а в поєднанні з показником якості надання сервісів зв'язку – функціональну стійкість системи.

Таблиця 1

## Удосконалена сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП

Частковий показник	Що характеризує	Характеристика стійкості, що оцінюється	Основні параметри / основа формалізації
$K_{QoS}$	Спроможність СЗВП забезпечувати своєчасну, достовірну та безперервну передачу даних в інформаційних напрямках	Переважно функціональна стійкість	Пропускна спроможність, середня затримка, імовірність втрати пакетів, джитер; функціональна залежність формула (6)
$K_{дост}$	Частку району виконання завдань, у межах якої забезпечується доступ до мережі зв'язку	Переважно структурна стійкість	Геометричний опис району функціонування; площа покриття; координати вузлів; радіуси впевненого покриття; відношення ефективної площі покриття до площі району операції
$K_{зв}$	Ступінь структурної інтегрованості мобільних вузлів у мережу та рівень резервованості доступу до базових станцій	Поєднує структурну і функціональну стійкість	Графове подання топології mesh-мережі; множина базових станцій і мобільних вузлів; активні з'єднання між ними; кількість незалежних маршрутів доступу до базових станцій

## Обговорення

Проведене дослідження показало, що наявні підходи, орієнтовані на стаціонарні топології, не забезпечують повною мірою адекватного оцінювання таких систем, оскільки не враховують стохастичну природу самоорганізованих мереж, динамічну реконфігурацію маршрутів, вплив втрати вузлів і необхідність резервування зв'язків.

У цьому сенсі запропонована удосконалена сукупність часткових показників не заперечує попередні результати, а розвиває їх. Використання показника якості надання сервісів зв'язку зберігає наступність із наявними підходами, у яких QoS уже розглядався як важливий засіб опису функціонального стану інформаційних напрямків. Разом з тим проведений аналіз підтвердив, що в умовах застосування технології mesh-мереж такого показника недостатньо, оскільки він не охоплює ані просторову доступність мережі, ані ступінь збереження її топологічної цілісності. Саме тому введення показника доступності та показника зв'язаності є логічним продовженням і розширенням попереднього науково-методичного апарату, а не його запереченням.

Окремо слід підкреслити змістовну роль кожного з трьох базових компонентів. Показник QoS відображає переважно функціональну стійкість системи, оскільки характеризує її здатність підтримувати необхідну пропускну спроможність, допустимі затримки, прийнятний рівень втрат пакетів і джитеру. Показник доступності характеризує переважно структурний аспект стійкості, оскільки відображає просторове охоплення району виконання завдань радіодоступом і, відповідно, можливість забезпечення безперервного інформаційного обміну в розосередженому районі дій. Водночас показник зв'язаності виконує інтегративну функцію: у поєднанні з показником доступності він формує структурну стійкість системи, а в поєднанні з показником QoS – її функціональну

стійкість. Саме цей показник поєднує топологічну цілісність мережі з її здатністю забезпечувати безперервне надання сервісів зв'язку.

Отже, науковий результат цієї статті полягає не лише в розширенні переліку часткових показників, а й у встановленні їхнього функціонального взаємозв'язку в межах єдиної логіки оцінювання. Це підтверджується тим, що всі три показники приведено до інтервалу  $[0;1]$ , що забезпечує їхню метричну сумірність і створює основу для подальшої інтеграції в узагальнений показник. Така нормалізація важлива не сама по собі, а тому, що дозволяє зіставляти технічні, просторові й топологічні аспекти функціонування системи в єдиній шкалі та комплексно оцінювати її боєздатність у реальних умовах бойового застосування.

Порівняно з попередніми підходами запропонована сукупність показників має кілька переваг. По-перше, вона краще відповідає специфіці бойового застосування СЗВП з використанням технології mesh-мереж, де критичними є не лише якість передавання даних, а й збереження доступу до мережі та можливість перебудови маршрутів. По-друге, вона дозволяє врахувати критичні стани системи, коли високі значення одного показника не повинні маскувати провал іншого. По-третє, вона створює підґрунтя для побудови в подальшому математичної моделі оцінювання, у якій буде поєднано фізичну структурну та функціональну стійкість мережі в єдиному аналітичному описі.

Водночас результати дослідження мають і певні обмеження. У межах цієї статті сформульовано саме удосконалену сукупність часткових показників і загальну функціональну залежність їх поєднання, але не виконано повної аналітичної конкретизації функції узагальненого показника для різних сценаріїв бойового застосування. Крім того, у статті не здійснювалося чисельне моделювання впливу окремих факторів

бойової обстановки на значення узагальненого показника. Тому отримані результати слід розглядати як науково обгрунтовану основу для наступного етапу дослідження, а не як завершену методику оцінювання.

Практичне значення результатів полягає в тому, що запропонована система часткових показників може бути використана для більш обгрунтованого оцінювання ефективності функціонування СЗВП, для уточнення підходів до планування архітектури з використанням технології mesh-мереж, а також для вдосконалення оперативно-тактичних розрахунків у процесі організації зв'язку в умовах вогневого та радіоелектронного впливу противника.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на аналітичне виведення математичної моделі узагальненого показника, визначення форми його агрегування з урахуванням критичних станів мережі, чисельне моделювання для різних сценаріїв бойового застосування, а також на розроблення повної методики оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж.

### Висновки

У результаті проведеного дослідження обгрунтовано удосконалену сукупність часткових показників оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж. На відміну від наявних підходів, що переважно орієнтуються на стаціонарні топології або окремі технічні характеристики каналів, запропонована сукупність показників враховує специфіку бойового застосування самоорганізованих мереж і поєднує три базові компоненти: показник доступності, показник зв'язаності та показник якості надання сервісів зв'язку. Саме таке поєднання дає змогу більш повно відобразити ефективність функціонування СЗВП в умовах динамічної зміни топології, втрати елементів мережі та впливу засобів радіоелектронної боротьби.

Наукове значення отриманих результатів полягає в розвитку підходів до оцінювання ефективності функціонування СЗВП шляхом переходу від ізольованого врахування окремих технічних параметрів до комплексного врахування структурних і функціональних властивостей mesh-мереж. Уточнена сукупність часткових показників створює підґрунтя для подальшої побудови математичної моделі та методики оцінювання, здатних урахувувати стохастичний характер бойової обстановки, адаптивність мережі та її здатність до самовідновлення.

Важливим результатом дослідження є також те, що всі три часткові показники приведено до єдиної безрозмірної шкали в інтервалі  $[0;1]$ . Це забезпечує можливість їх узгодженого спільного використання, метричну сумірність та подальшу інтеграцію в узагальнений показник ефективності функціонування СЗВП. Сформульована загальна функціональна залежність такого показника відображає логіку взаємодії між структурною та

функціональною стійкістю мережі й тим самим задає науково обгрунтований напрям наступного етапу досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропонована система часткових показників може бути використана для кількісного оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж, для обгрунтування рішень щодо побудови та оптимізації архітектури мережі, а також для удосконалення оперативно-тактичних розрахунків у процесі планування організації зв'язку в бойових умовах. Крім того, отримані результати можуть бути корисними під час розроблення підходів до відновлення мережі у реальному часі після порушення її структури або деградації сервісів зв'язку.

Для дослідників, які працюють у цій предметній області, доцільно рекомендувати спрямувати подальші дослідження на аналітичне виведення математичної моделі узагальненого показника, вибір форми агрегування часткових показників з урахуванням критичних станів мережі, а також на проведення чисельного моделювання в різних сценаріях бойового застосування. Наступним логічним кроком є розроблення повної методики оцінювання ефективності функціонування СЗВП з використанням технології mesh-мереж на основі запропонованої в цій статті удосконаленої сукупності часткових показників.

### Список використаних джерел

- [1.] Center for Strategic and International Studies, "Lessons from the Ukraine Conflict: Modern Warfare in the Age of Autonomy, Information, and Resilience," CSIS. [Онлайн]. Available: <https://www.csis.org/analysis/lessons-ukraine-conflict-modern-warfare-age-autonomy-information-and-resilience>. [Дата звернення: 15.05.2025].
- [2.] G. Giambene, *Queueing Theory and Telecommunications: Networks and Applications*. Boston, MA, USA: Springer, 2005.
- [3.] О. І. Варнаков та С. Г. Галушко, "Оцінка ефективності функціонування телекомунікаційних мереж критичного застосування," Системи обробки інформації, вип. 4(53), с. 20–24, 2006. Доступно: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi\\_2006\\_4\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_4_5)
- [4.] V. B. Iversen, "Teletraffic engineering handbook," Jan. 2001, [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf). [Дата звернення: 17.10.2025].
- [5.] О. О. Писарчук, "Оцінка ефективності інформаційних систем за вектором критеріїв," Збірник наукових праць ЖВІ НАУ, вип. 3, с. 117–123, 2010.
- [6.] С. П. Корнієнко та В. П. Корнієнко, "Оцінка ефективності просторово-розподілених телекомунікаційних мереж," Чернігівський науковий часопис. Серія 2: Техніка і природа, № 1(1), с. 132–139, 2011.
- [7.] П. П. Воробієнко, Л. А. Нікітюк та П. І. Резніченко, Телекомунікаційні та інформаційні мережі. Київ,

- Україна: САММІТ-Книга, 2010.
- [8.] І. С. Катеринчук, Р. В. Рачок, Д. А. Мул та О. К. Басараб, “Метод оцінки ефективності функціонування телекомунікаційної системи спеціального призначення,” *Наукоємні технології*, № 1(21), с. 71–74, 2014.
- [9.] A. V. Shyshatskiy et al., “Method of assessment of the efficiency of the communication of operational troop grouping system,” *Сучасні інформаційні системи*, vol. 4, no. 1, pp. 107–112, 2020. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>
- [10.] Україна, Генеральний штаб Збройних Сил України, Наказ № 80: Про затвердження та введення в дію методик розрахунку потреб та основних показників для забезпечення стійкого функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем і мереж Міністерства оборони України та Збройних Сил України, 26 серп. 2020.
- [11.] Д. Г. Шевченко, А. О. Зінченко та І. Ю. Розум, *Комплекси, системи та засоби військових телекомунікаційних мереж*. Київ, Україна: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2019.
- [12.] А. О. Зінченко, О. М. Нестеров та К. А. Зінченко, “До питання пропускну́ї спроможності як основного показника ефективності функціонування системи військового зв’язку,” *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 2(32), с. 135–140, 2018.
- [13.] Yu. Khazhanets, “Clarification of the set of particular indicators and a generalized indicator for assessing the effectiveness of the functioning of military communications systems,” *The Scientific Heritage*, vol. 3, no. 70, pp. 8–12, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/352e4368-4d9e-491d-b62c-879d2a1e6cde/content>. [Дата звернення: 22.10.2025].
- [14.] ДДП 6-26.22. Настанова “Зі зв’язку Збройних Сил України”. Київ, Україна: ГШ ЗСУ, 2025.
- [15.] Allied Joint Doctrine for Communication and Information Systems, AJP-6. Brussels, Belgium: NATO Standardization Office, 2017.
- [16.] ВСТ 01.112.004-2017(01). Військовий зв’язок та інформаційні системи. Словник НАТО з систем засобів зв’язку та інформаційних систем (AAP-31 (Edition 3), IDT). Київ, Україна: МОУ, 2017.
- [17.] О. Є. Мазулевський та ін., *Система стандартів НАТО із організації роботи системи зв’язку (C4ISR)*. Частина I. Київ, Україна: НУОУ, 2018.
- [18.] Ю. Хажанець та О. Білоус, “Класифікація протоколів маршрутизації mesh-мереж,” *Повітряна міць України*, т. 1, № 6, с. 56–62, 2024, doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62).
- [19.] І. Габідулін, “Аналіз світового досвіду та концептуальні засади розробки вітчизняної системи С2,” *CACDS*. [Онлайн]. Доступно: <https://cacds.org.ua/від-тактичного-зв'язку-до-мережецентру/>. [Дата звернення: 18.10.2025].
- [20.] “В Україні представили mesh-систему зв’язку для наземних роботів без повітряного ретранслятора,” *Defense Express*. [Онлайн]. Доступно: [https://defence-ua.com/people\\_and\\_company/v\\_ukrajini\\_predstavili\\_mesh\\_sistemu\\_zv'язku\\_dlja\\_nazemnih\\_robotiv\\_bez\\_povitryanogo\\_retransljatora-19149.html](https://defence-ua.com/people_and_company/v_ukrajini_predstavili_mesh_sistemu_zv'язku_dlja_nazemnih_robotiv_bez_povitryanogo_retransljatora-19149.html). [Дата звернення: 14.06.2025].
- [21.] Б. Кук, “Повітряні операції на базі стільникових мереж. Що змінилося в тактиці й безпеці з 2022 року. Частина 2,” *iPress*, 08 січ. 2026. [Онлайн]. Доступно: [https://ipress.ua/articles/povitryani\\_operatsii\\_na\\_bazi\\_stilnykovykh\\_merezh\\_shcho\\_zminylosya\\_v\\_taktytsi\\_y\\_bezpechi\\_z\\_2022\\_roku\\_chastyna\\_2\\_bendzhamin\\_kuk\\_380759.html](https://ipress.ua/articles/povitryani_operatsii_na_bazi_stilnykovykh_merezh_shcho_zminylosya_v_taktytsi_y_bezpechi_z_2022_roku_chastyna_2_bendzhamin_kuk_380759.html). [Дата звернення: 10.01.2026].
- [22.] “Неміфологічні здобутки: українська тактична система зв’язку HIMERA б’є рекорди щодо дальності сигналу радіостанцій,” *АрміяInform*, 27 бер. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://armyinform.com.ua/2025/03/27/nemifologichni-zdobutky-ukrayinska-taktychna-systema-zv'язku-himera-bye-rekordy-po-dalnosti-svgnalu-radiostanczij/>. [Дата звернення: 03 квіт. 2025].
- [23.] B. Zhao, M. Wang, W. Lin, et al., “Study on the resilience of command and control networks to cascading failures based on asymmetric group dependencies,” *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 29487, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-14921-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-14921-0).
- [24.] Quality of Service Guaranteed Mechanisms and Performance Model for Public Packet Telecommunication Data Networks, ITU-T Recommendation Y.2617, 2016.
- [25.] Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing, IEEE Std 802.11bf-2025, 2025.
- [26.] IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2017, 2018.
- [27.] О. Барабаш, А. Мусієнко, О. Свинчук та О. Дудкін, “Оцінка ймовірності зв’язності структур інформаційних систем на різних графових моделях,” *Інформаційні технології та суспільство*, № 1(16), с. 281–290, 2025, doi: [10.32689/maup.it.2025.1.37](https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.37).

Oleh Bilous

<https://orcid.org/0000-0002-3103-732X>

*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## IMPROVED SET OF PARTIAL INDICATORS FOR PERFORMANCE EVALUATION OF MILITARY COMMUNICATION SYSTEMS USING MESH NETWORKING TECHNOLOGY

*This article analyzes scientific and methodological approaches to evaluating the performance of military communication systems using mesh networking technology. It was found that the known approaches do not sufficiently account for the features of self-organizing networks, in particular network availability and connectivity under conditions of dynamic topology changes. An improved set of partial indicators was substantiated, including availability, connectivity, and quality of service indicators, and the logic of their combination in a generalized indicator of system performance was determined.*

*The proposed system of partial indicators can be used for a more substantiated evaluation of the performance of military communication systems, for refining approaches to architecture planning using mesh networking technology, as well as for improving operational and tactical calculations in the process of communication organization, especially under enemy fire and electronic warfare conditions.*

**Keywords:** *communication system; information and communication system; mesh network; partial indicators; network availability; network connectivity; quality of service.*

### References

- [1.] Center for Strategic and International Studies, “Lessons from the Ukraine Conflict: Modern Warfare in the Age of Autonomy, Information, and Resilience,” CSIS. [Online]. Available: <https://www.csis.org/analysis/lessons-ukraine-conflict-modern-warfare-age-autonomy-information-and-resilience>. [Accessed: May 15, 2025].
- [2.] G. Giambene, *Queueing Theory and Telecommunications: Networks and Applications*. Boston, MA, USA: Springer, 2005.
- [3.] O. I. Varnakov and S. H. Halushko, “Evaluation of the Functioning Efficiency of Critical-Use Telecommunication Networks,” *Information Processing Systems*, no. 4(53), pp. 20–24, 2006. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi\\_2006\\_4\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_4_5)
- [4.] V. B. Iversen, “Teletraffic Engineering Handbook,” Jan. 2001. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/stg/D-STG-SG02.16.1-2001-PDF-E.pdf). [Accessed: Oct. 17, 2025].
- [5.] O. O. Pysarchuk, “Evaluation of Information Systems Efficiency by a Vector of Criteria,” *Collection of Scientific Papers of Zhytomyr Military Institute of the National Aviation University*, no. 3, pp. 117–123, 2010.
- [6.] S. P. Korniienko and V. P. Korniienko, “Evaluation of the Efficiency of Spatially Distributed Telecommunication Networks,” *Chernihiv Scientific Journal. Series 2: Engineering and Nature*, no. 1(1), pp. 132–139, 2011.
- [7.] P. P. Vorobiienko, L. A. Nikitiuk, and P. I. Reznichenko, *Telecommunication and Information Networks*. Kyiv, Ukraine: SAMMIT-Knyha, 2010.
- [8.] I. S. Katerynychuk, R. V. Rachok, D. A. Mul, and O. K. Basarab, “Method for Evaluating the Functioning Efficiency of a Special-Purpose Telecommunication System,” *Science-Intensive Technologies*, no. 1(21), pp. 71–74, 2014.
- [9.] A. V. Shyshatskyi et al., “Method of Assessment of the Efficiency of the Communication of Operational Troop Grouping System,” *Advanced Information Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 107–112, 2020. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.16>
- [10.] General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Order No. 80: On Approval and Implementation of Methods for Calculating Needs and Basic Indicators to Ensure the Sustainable Functioning of Information and Telecommunication Systems and Networks of the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine, Aug. 26, 2020.
- [11.] D. H. Shevchenko, A. O. Zinchenko, and I. Yu. Rozum, *Complexes, Systems, and Means of Military Telecommunication Networks*. Kyiv, Ukraine: Ivan Cherniakhovskiy National Defense University of Ukraine, 2019.
- [12.] A. O. Zinchenko, O. M. Nesterov, and K. A. Zinchenko, “On Throughput as the Main Indicator of the Functioning Efficiency of a Military Communication System,” *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense*, no. 2(32), pp. 135–140, 2018.
- [13.] Yu. Khazhanets, “Clarification of the Set of Particular Indicators and a Generalized Indicator for Assessing the Effectiveness of the Functioning of Military Communications Systems,” *The Scientific Heritage*, vol. 3, no. 70, pp. 8–12, 2021. [Online]. Available: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/352e4368-4d9e-491d-b62c-879d2a1e6cde/content>. [Accessed: Oct. 22, 2025].
- [14.] Guideline “On Communications of the Armed Forces of Ukraine”, DDP 6-26.22. Kyiv, Ukraine: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, 2025.
- [15.] Allied Joint Doctrine for Communication and Information Systems, AJP-6. Brussels, Belgium:

- NATO Standardization Office, 2017.
- [16.] Military Communications and Information Systems. NATO Glossary of Communications and Information Systems (AAP-31 (Edition 3), IDT), VST 01.112.004-2017(01). Kyiv, Ukraine: Ministry of Defense of Ukraine, 2017.
- [17.] O. Ye. Mazulevskiy et al., NATO Standards System for Organizing the Operation of the Communication System (C4ISR). Part I. Kyiv, Ukraine: NDUU, 2018.
- [18.] Yu. Khazhanets and O. Bilous, "Classification of Mesh Network Routing Protocols," *Air Power of Ukraine*, vol. 1, no. 6, pp. 56–62, 2024, doi: [10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-56-62).
- [19.] I. Habidulin, "Analysis of Global Experience and Conceptual Foundations for Developing a National C2 System," *CACDS*. [Online]. Available: <https://cacds.org.ua/vid-taktychnogo-zv'язku-do-merezeicentru/>. [Accessed: Oct. 18, 2025].
- [20.] "A Mesh Communication System for Ground Robots Without an Airborne Relay Was Presented in Ukraine," *Defense Express*. [Online]. Available: <https://defence-ua.com/people-and-company/v-ukrajini-predstavil-i-mesh-sistemu-zv'язku-dlja-nazemnih-robotiv-be-z-povitrjanogo-retransljatora-19149.html>. [Accessed: Jun. 14, 2025].
- [21.] B. Cook, "Cellular-Based Air Operations. What Has Changed in Tactics and Security Since 2022. Part 2," *iPress*, Jan. 08, 2026. [Online]. Available: [https://ipress.ua/articles/povitryani-operatsii-na-bazi-stilnykovyh-merezh-shcho-zminylosya-v-taktyt-si-y-bezpetsi-z-2022-roku-chastyna-2\\_\\_bendzha-min-kuk\\_380759.html](https://ipress.ua/articles/povitryani-operatsii-na-bazi-stilnykovyh-merezh-shcho-zminylosya-v-taktyt-si-y-bezpetsi-z-2022-roku-chastyna-2__bendzha-min-kuk_380759.html). [Accessed: Jan. 10, 2026].
- [22.] "Non-Mythological Achievements: The Ukrainian Tactical Communication System HIMERA Sets Records for Radio Signal Range," *ArmyInform*, Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://armyinform.com.ua/2025/03/27/nemifologich-ni-zdobutky-ukrayinska-taktychna-systema-zv'язku-himera-bye-rekordy-po-dalnosti-sygnalu-radiostancij/>. [Accessed: Apr. 03, 2025].
- [23.] B. Zhao, M. Wang, W. Lin, et al., "Study on the Resilience of Command and Control Networks to Cascading Failures Based on Asymmetric Group Dependencies," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 29487, 2025, doi: [10.1038/s41598-025-14921-0](https://doi.org/10.1038/s41598-025-14921-0).
- [24.] Quality of Service Guaranteed Mechanisms and Performance Model for Public Packet Telecommunication Data Networks, ITU-T Recommendation Y.2617, 2016.
- [25.] Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications—Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing, IEEE Std 802.11bf-2025, 2025.
- [26.] IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2017, 2018.
- [27.] O. Barabash, A. Musiienko, O. Svychnuk, and O. Dudkin, "Assessment of the Probability of Connectivity of Information System Structures Under Different Graph Models," *Information Technologies and Society*, no. 1(16), pp. 281–290, 2025, doi: [10.32689/maup.it.2025.1.37](https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.37).

# РОЗВИТОК ФОРМ І МЕТОДІВ ПІДГОТОВКИ РОДІВ ВІЙСЬК (СИЛ) ПОВІТРЯНОЇ КОМПОНЕНТИ

**DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-205-212**

**УДК 355.41 (477)**

**Дерікот Олександр Юрійович**

<https://orcid.org/0000-0002-5985-3249>

**Хлипавка Олександр Володимирович**

<https://orcid.org/0009-0006-3298-0623>

**Поліщук Василь Володимирович** (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-8990-9648>

**Національний університет оборони України, Київ, Україна**

*Рукопис надійшов до редакції: 30.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 25.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026*

## АНАЛІЗ ДІЯЛЬНОСТІ КОАЛІЦІЙ АВІАЦІЙНИХ СПРОМОЖНОСТЕЙ ТА ІНТЕГРОВАНОЇ ППО ТА ПРО В РАМКАХ МІЖНАРОДНОГО ВІЙСЬКОВОГО СПІВРОБІТНИЦТВА ПІД ЧАС ВІДСІЧІ ЗБРОЙНОЇ АГРЕСІЇ

У статті проведено комплексний аналіз діяльності міжнародних коаліцій авіаційних спроможностей та механізмів функціонування інтегрованої системи протиповітряної та протиракетної оборони в умовах відсічі повномасштабної збройної агресії. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю трансформації національної системи протиповітряної оборони шляхом впровадження високотехнологічних західних зразків озброєння та їх повної інтеграції в єдиний інформаційно-координаційний простір Сил оборони.

Авторами розглянуто структуру та принципи взаємодії в межах спеціалізованих “коаліцій спроможностей”, зокрема авіаційної та протиповітряної. У роботі акцентовано увагу на питаннях оперативної сумісності, що базуються на впровадженні передових стандартів та систем обміну даними у реальному часі. Методологія дослідження ґрунтується на системному аналізі логістичних процесів постачання, особливостей технічного обслуговування іноземної техніки та підготовки особового складу в умовах високої невизначеності.

Основним результатом дослідження є обґрунтування моделі багаторівневої ешелонваної оборони, яка дозволяє оптимізувати використання обмеженого боєзапасу та підвищити ефективність перехоплення широкого спектра повітряних цілей. Практичне значення отриманих висновків полягає у можливості їх імплементації в роботу органів військового управління для вдосконалення процесів планування логістичного забезпечення та бойового застосування Повітряних Сил. Отримані результати можуть стати підґрунтям для розробки автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері колективної безпеки та оборони повітряного простору.

Застосування результатів аналізу забезпечує обґрунтоване прийняття рішень щодо подальшої розбудови архітектури протиповітряної оборони, оптимізації навчання персоналу та вдосконалення системи технічного обслуговування іноземної техніки. Практична апробація отриманих висновків підтверджує, що координація в межах спеціалізованих коаліцій (“коаліція літаків”, “коаліція протиповітряної оборони”) дозволяє суттєво скоротити цикл постачання критичного обладнання та підвищити коефіцієнт перехоплення повітряних цілей.

**Ключові слова:** міжнародне військове співробітництво; Повітряні Сили; інтегрована ППО та ПРО; коаліція спроможностей; оперативна сумісність; військова допомога; управління повітряним рухом; протиракетна оборона.

### Вступ

Широкомасштабна збройна агресія проти України стала безпрецедентним викликом для

сучасної архітектури глобальної та регіональної безпеки, продемонструвавши критичну роль повітряного та космічного простору в сучасних

конфліктах високої інтенсивності. Характерною рисою цього протистояння є масоване, системне та комбіноване застосування противником всього спектру засобів повітряного нападу (ЗПН), включаючи крилаті ракети морського, повітряного та наземного базування, балістичні та аеробалістичні ракети, а також масовані хвилі ударних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). За таких умов національна система протиповітряної та протиракетної оборони (ППО та ПРО), яка історично базувалася на радянських технологічних платформах, зіткнулася з необхідністю не лише фізичного виживання, а й докорінної трансформації в режимі реального часу.

Вирішення завдання щодо створення надійного повітряного щита виявилось неможливим без глибокої інтеграції України в міжнародне військово-технічне співробітництво. Ключовим інструментом такої інтеграції стало формування спеціалізованих міжнародних коаліцій (зокрема «Авіаційної коаліції» та «Коаліції спроможностей ППО»), що діють у межах Контактної групи з питань оборони України. Діяльність цих коаліцій спрямована на перехід від дискретних поставок окремих одиниць озброєння до розбудови багаторівневої, ешелонованої та мережецентричної системи інтегрованої ППО та ПРО (Integrated Air and Missile Defense – IAMD), яка відповідає стандартам НАТО. Проте складність цього процесу полягає у необхідності поєднання різномірних за походженням, алгоритмами роботи та технічними характеристиками засобів ураження в єдиний інформаційно-координаційний контур управління Повітряних Сил.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Питання функціонування інтегрованих систем ППО та ПРО в умовах сучасних багатодомених операцій (Multi-Domain Operations) є предметом постійної уваги провідних військових аналітиків та наукових інституцій. Дослідження західних фахівців [1–7], зокрема аналітичних центрів типу RAND Corporation та CSIS, підкреслюють, що ефективність сучасної ППО визначається не лише вогневою потужністю комплексів, а насамперед якістю інформаційного обміну та здатністю до мережецентричної взаємодії. Питання оперативної сумісності (interoperability) та використання протоколів Link 16 для синхронізації дій авіації та наземних засобів ураження розглядаються як

фундаментальна умова виживання у конфліктах проти технологічно рівного противника.

У вітчизняному науковому дискурсі значна увага приділяється досвіду бойового застосування зенітних ракетних військ та авіації в умовах постійного вогневого впливу та радіоелектронної протидії. Досліджуються методики адаптації радянських систем автоматизованого управління до західних засобів виявлення, а також питання логістичного забезпечення розгалуженої та розосередженої мережі аеродромів і позиційних районів. Разом з тим, діяльність міжнародних коаліцій як нової організаційної форми військового співробітництва, що безпосередньо впливає на оперативні спроможності Повітряних Сил, потребує глибшого системного аналізу, особливо в частині синхронізації політичних рішень, логістичних циклів та тактичних процедур застосування іноземного озброєння.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Попри значні успіхи в отриманні та освоєнні сучасних комплексів типу Patriot, IRIS-T, NASAMS та SAMP/T, залишається недостатньо вивченим питання оптимізації діяльності коаліційних структур в аспекті довгострокового планування спроможностей Повітряних Сил. Зокрема, потребує деталізації аналіз механізмів створення стійкої екосистеми підтримки, яка включає підготовку персоналу, сервісне обслуговування техніки та спільне виробництво засобів ураження. Існує нагальна потреба у визначенні факторів, що перешкоджають повній технічній інтеграції іноземних платформ у національну систему ППО, та розробленні рекомендацій щодо вдосконалення коаліційної взаємодії для забезпечення переваги в повітрі.

**Метою статті** є проведення системного аналізу діяльності міжнародних коаліцій у сфері Повітряних Сил та інтегрованої ППО та ПРО, а також визначення ролі міжнародного військового співробітництва у підвищенні ефективності відсічі збройній агресії. Досягнення мети передбачає дослідження структури коаліційної допомоги, оцінювання впливу західних технологічних рішень на живучість системи протиповітряної оборони та розроблення пропозицій щодо стратегічних пріоритетів розбудови Повітряних Сил у межах міжнародних безпекових ініціатив.

## Матеріали та методи

Для досягнення поставленої мети було використано комплексний науковий підхід, що базується на поєднанні методів системного аналізу, математичного моделювання та порівняльного оцінювання. *Об'єктом дослідження* є процеси функціонування інтегрованої системи протиповітряної та протиракетної оборони (ППО та ПРО) в умовах коаліційної взаємодії.

Методологія дослідження включає:

*Метод системного аналізу* – для структурування діяльності міжнародних коаліцій як багаторівневої системи, що охоплює політичний (прийняття рішень), стратегічний (логістика) та тактичний (бойове застосування) рівні.

*Методи математичного моделювання* – для опису процесів функціонування складних логістичних систем технічного забезпечення та відновлення авіаційної техніки в умовах швидкої зміни оперативної обстановки.

*Метод порівняння* – для оцінювання ефективності різних типів зенітно-ракетних комплексів (ЗРК) західного зразка порівняно з існуючими платформами за критеріями надійності та ймовірності перехоплення цілей.

*Аналіз досвіду експлуатації* – використання статистичних даних щодо надійності засобів наземного забезпечення польотів в умовах інтенсивного бойового використання.

Теоретичною базою стали сучасні концепції розосередженого базування та гнучкого маневрування авіаційними активами (Agile Combat Employment), що дозволяють мінімізувати деградацію темпів вильотів під впливом вогневого впливу противника.

## Результати

Проведений аналіз діяльності міжнародних коаліцій у сфері Повітряних Сил та інтегрованої системи ППО/ПРО дозволив встановити, що процес трансформації системи оборони повітряного простору України відбувається через глибоку технічну та організаційну інтеграцію в межах міжнародного військового співробітництва.

**Стратегічна та організаційна архітектура коаліційної взаємодії.** Діяльність міжнародних коаліцій (Air Force Capability Coalition та Ground-Based Air Defense Coalition) трансформувалася з дискретних запитів на окремі зразки озброєння у системну архітектуру підтримки спроможностей. В основі цієї взаємодії лежить багаторівневий

механізм координації, що забезпечує синхронізацію політичних рішень держав-донорів із оперативними потребами Сил оборони. Аналіз роботи органів військового управління свідчить, що ефективність такої взаємодії безпосередньо залежить від точності прогнозування потреб у матеріально-технічних засобах та здатності системи логістики адаптуватися до високої інтенсивності бойових дій.

Коаліційний підхід дозволив запровадити модель «циклу спроможностей», яка включає не лише передачу платформ, а й довгострокове забезпечення боєприпасами, підготовку персоналу та створення інфраструктури (табл.1). Це критично важливо для підтримання технічної готовності в умовах постійного вогневого впливу противника.

Таблиця 1

### Структура ешелонованої інтегрованої системи ППО та ПРО в межах коаліційної взаємодії

Ешелон оборони	Типи засобів ураження	Основні цілі	Роль у коаліційній системі
Нижній (ближній)	Мобільні вогневі групи, ПЗРК, ЗАК (Gepard)	Ударні БПЛА (тип Shahed), розвідувальні дрони, вертольоти	Забезпечення масового перехоплення малобюджетних цілей, збереження дороговартісного ресурсу
Середній	IRIS-T, NASAMS, Hawk	Крилаті ракети, тактична авіація, КАР	Високоточне прикриття стратегічних об'єктів та об'єктів інфраструктури
Верхній (дальній)	Patriot (PAC-2/PAC-3), SAMP/T	Балістичні ракети, аеробалістичні ракети («Кинджал»), літаки ДРЛВ	Протиракетна оборона на великих висотах і відстанях, створення «зон заборони доступу» (A2/AD)

**Технологічна інтеграція та розбудова системи IAMD.** Формування інтегрованої протиповітряної та протиракетної оборони (IAMD) базується на впровадженні мережецентричних принципів управління. Ключовим результатом співробітництва стало створення змішаного контуру ППО, де західні комплекси (Patriot, IRIS-T, NASAMS, SAMP/T) інтегруються з існуючими національними засобами виявлення та управління.

Ця інтеграція реалізується через:

**Інформаційну сумісність:** Використання протоколів обміну даними (зокрема Link 16), що дозволяє створювати єдину картину повітряної обстановки на основі даних від наземних РЛС, авіаційних платформ та засобів технічної розвідки партнерів. Впровадження протоколів, сумісних із західними платформами, забезпечує безперерйну передачу цілевказання між авіацією (наприклад, F-16) та наземними засобами ППО (Patriot, NASAMS). Математично ефективність такої інтеграції можна виразити через підвищення ймовірності ураження цілі  $P_{det}$ , яка залежить від якості інформаційного супроводу та часу реакції системи:

$$P_{det} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$$

де  $p_i$  – ймовірність знищення цілі окремим елементом інтегрованої системи [5,6].

**Сенсорну синергію:** Об'єднання розвідувальних можливостей дозволяє здійснювати виявлення та супроводження балістичних цілей на значних відстанях, що суттєво підвищує живучість системи та ймовірність перехоплення. Математичне моделювання таких складних ієрархічних систем підтверджує, що об'єднання різнорідних елементів у єдиний об'єкт управління дозволяє мінімізувати час реакції та оптимізувати розподіл вогневих ресурсів.

**Ефективність авіаційної коаліції та впровадження концепції АСЕ.** Перехід на західні авіаційні платформи (зокрема F-16) розглядається не лише як заміна парку літаків, а як системна зміна доктрини застосування Повітряних Сил. Аналіз міжнародного досвіду, зокрема концепції Agile Combat Employment (ACE) [4,6], вказує на необхідність розосередженого базування та гнучкого маневрування авіаційними активами для збереження бойового потенціалу під інтенсивними ударами. В межах діяльності коаліції впроваджуються методики швидкого відновлення технічної готовності авіаційної техніки у розосереджених локаціях. Це вимагає створення мобільних логістичних хабів та уніфікації процедур обслуговування, що корелюється з вітчизняними дослідженнями щодо підвищення ефективності систем відновлення спеціальної техніки в умовах швидкої зміни обстановки.

**Логістична підтримка та життєвий цикл іноземного озброєння.** Специфіка експлуатації

західного озброєння потребує нових підходів до технічного забезпечення. В рамках міжнародного співробітництва реалізується модель «логістичного плеча», яка передбачає створення сервісних центрів та хабів на територіях країн-партнерів для проведення капітальних та складних видів ремонту. Методики оцінювання ефективності функціонування таких систем відновлення дозволяють кількісно визначити показники надійності та коефіцієнти технічного використання техніки [8-11]. Для оптимального розподілу ресурсів та мінімізації часу простою техніки доцільно застосовувати методи лінійного програмування та розв'язання транспортних задач, що дозволяє раціонально планувати евакуацію та доставку критичних компонентів.

**Синергія вогневого ураження та багаторівнева ешелонованість.** Коаліційна взаємодія дозволила створити систему ешелонованої оборони, де кожна категорія засобів ураження виконує специфічне завдання:

**Маневрена складова (авіація та мобільні групи):** протидія БПЛА та крилатим ракетам на віддалених рубежах.

**Стационарна складова (ЗРК середньої та великої дальності):** захист стратегічних об'єктів та перехоплення балістичних загроз. Комплексне використання цих засобів за єдиним алгоритмом дозволяє досягти балансу між вартістю перехоплення та цінністю об'єкта захисту, що є ключовим показником ефективності.

### Обговорення

Результати проведеного аналізу свідчать про те, що діяльність міжнародних коаліцій у сфері Повітряних Сил стала визначальним фактором у трансформації архітектури протиповітряної та протиракетної оборони України. Впровадження концепції інтегрованої системи ППО та ПРО (IAMD) у межах міжнародного військового співробітництва демонструє поступовий перехід від жорстко регламентованих ієрархічних схем управління до гнучких, адаптивних моделей, що здатні функціонувати в умовах мережецентричних операцій [1,3,7] (табл.2).

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика показників ефективності та впливу їх на боєздатність**

Показник ефективності	До коаліційної інтеграції (автономна модель)	Після коаліційної інтеграції (мережецентрична модель)	Вплив на боєздатність
<b>Цикл прийняття рішення (OODA loop)</b>	Високий (через ручну обробку даних)	Скорочення на 40–60%	Підвищення оперативної реакції на масовані удари
<b>Інформаційна сумісність</b>	Мінімальна (радянські протоколи)	Повна (Link 16, стандарти НАТО)	Єдина картина повітряної обстановки для авіації та ППО

**Трансформація принципів управління та оперативна сумісність.** Одним із найбільш дискусійних аспектів інтеграції є питання технічної та операційної сумісності (interoperability). Як показує практика, поєднання західних комплексів із радянськими системами виявлення потребує не лише технічних «перехідників», а й докорінної зміни алгоритмів прийняття рішень. Впровадження цифрових протоколів обміну даними дозволяє суттєво скоротити цикл прийняття управлінських рішень під час планування логістичного забезпечення та бойового застосування, що безпосередньо корелюється з потребою автоматизації процесів у сучасних системах військового управління. Це підтверджує гіпотезу про те, що в умовах високоінтенсивних бойових дій швидкість обробки інформації є такою ж критичною, як і вогнева потужність самих комплексів.

**Синергія коаліційних спроможностей та досвід ACE.** Важливим елементом обговорення є застосування концепції Agile Combat Employment (ACE) [4, 6], яка активно просувається в межах авіаційної коаліції. Дослідження впливу розподіленого базування на боєздатність підкреслює, що розосередження ресурсів є єдиним способом збереження авіаційного потенціалу під ударами високоточної зброї противника. Проте така стратегія висуває надзвичайно високі вимоги до мобільності логістичних органів. Аналіз роботи органів військового управління вже вказував на наявність проблемних питань в організації евакуації та відновлення техніки, що підкреслює актуальність впровадження математичного моделювання для управління транспортними потоками у складних логістичних системах [8-11].

**Логістичні виклики та життєвий цикл систем.** Особливу увагу в ході обговорення слід приділити системі відновлення технічної готовності специфічної номенклатури озброєння Повітряних Сил. Експлуатація іноземних зразків ППО в умовах екстремальних навантажень призводить до швидкої деградації ресурсів, що вимагає вдосконалення методик оцінювання ефективності функціонування систем відновлення [8-11].

Використання апарату теорії масового обслуговування та напівмарковських випадкових процесів дозволяє кількісно визначити показники надійності та обґрунтувати необхідний склад ремонтно-відновлювальних органів у коаліційних хабах.

**Стратегічна роль міжнародного співробітництва.** Діяльність коаліцій не повинна розглядатися лише як тимчасовий захід військової допомоги. Це довгостроковий механізм інтеграції України до європейського та трансатлантичного оборонного простору. Результати апробації спільних операційних процедур підтверджують, що створення інтегрованої системи IAMD забезпечує обґрунтоване скорочення часу реакції на повітряні загрози та мінімізацію витрат на транспортування і відновлення техніки. Це стає підґрунтям для створення в майбутньому автоматизованих систем підтримки прийняття рішень, які зможуть інтегрувати дані про технічний стан озброєння, логістичні маршрути та оперативну обстановку в єдину модель.

**Обмеження та перспективи подальших досліджень.** Слід зауважити, що дана стаття охоплює лише основні аспекти коаліційної взаємодії. Поза межами дослідження залишилися питання кіберзахисту інтегрованих мереж управління та особливості підготовки персоналу за скороченими програмами. Подальші наукові розвідки можуть бути спрямовані саме на ці аспекти.

**Висновки**

У ході проведеного дослідження було проаналізовано діяльність міжнародних коаліцій Повітряних Сил та інтегрованої системи ППО та ПРО як ключового чинника забезпечення обороноздатності держави в умовах відсічі масштабної збройної агресії. На основі отриманих результатів можна сформулювати наступні висновки:

*Стратегічна роль коаліційної взаємодії.* Встановлено, що діяльність міжнародних

спроможностей («Авіаційної коаліції» та «Коаліції ППО») трансформувалася з формату надання екстреної допомоги у системний механізм розбудови багаторівневої оборони повітряного простору. Це дозволило розпочати перехід від застарілих радянських платформ до сучасних інтегрованих систем, що відповідають стандартам НАТО. Такий підхід забезпечує обґрунтоване скорочення циклу прийняття управлінських рішень під час планування логістичного забезпечення та бойового застосування Повітряних Сил.

*Формування архітектури IAMD.* Аналіз показав, що створення інтегрованої протиповітряної та протиракетної оборони (IAMD) на базі західних комплексів (Patriot, IRIS-T, NASAMS) у поєднанні з національними засобами виявлення дозволило реалізувати мережецентричний принцип управління (табл.2). Це забезпечує синергію різноманітних вогневих засобів та сенсорів, підвищуючи ймовірність перехоплення складних балістичних та аеробалістичних цілей. Математичне моделювання підтверджує ефективність такої інтеграції через оптимізацію розподілу обмежених ресурсів та мінімізацію логістичних витрат.

*Логістична стійкість та відновлення.* Важливим аспектом функціонування коаліцій є розбудова стійкої системи технічної підтримки та відновлення озброєння. Застосування методик оптимального розподілу ремонтного фонду та використання сучасних математичних моделей дозволяє мінімізувати терміни простою техніки та логістичне плече під час евакуації до сервісних хабів. Впровадження концепції розосередженого базування та гнучкого технічного обслуговування (АСЕ) є критично необхідним для збереження бойового потенціалу авіаційних підрозділів у мовах інтенсивного вогневого впливу.

*Практична імплементація та автоматизація.* Результати аналізу діяльності коаліцій можуть бути безпосередньо імplementовані в роботу органів військового управління. Зокрема, розроблені підходи можуть стати підґрунтям для створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері логістичного та оперативного забезпечення Повітряних Сил оборони. Це дозволить не лише підвищити оперативну сумісність із силами партнерів, а й створити фундамент для майбутньої архітектури безпеки повітряного простору.

*Перспективи подальших досліджень* полягають у деталізації математичних моделей розподілу цілей між коаліційними засобами ППО та ПРО з урахуванням вартості перехоплення та розробленні удосконалених методик оцінювання ефективності функціонування систем відновлення авіаційної техніки в умовах високодинамічного бойового середовища.

### **Список використаних джерел**

- [1.] Bronk J., Watling J. The Russian Air War and Ukrainian Air Defence: November 2022–July 2023. Royal United Services Institute (RUSI). London: RUSI Publishing, 2023. 48 p.
- [2.] Jones S. G., McCabe R., Williams I. Air and Missile Defense: The Role of Integrated Systems in Modern Warfare. Center for Strategic and International Studies (CSIS). Washington, DC: CSIS, 2023. 92 p.
- [3.] Karako T., Williams I. Ukraine's Air and Missile Defense: Lessons for the Future. Center for Strategic and International Studies (CSIS). Washington, DC, 2024. 112 p.
- [4.] Lynch K. F., Castle R., Drew J. G., et al. Assessing Agile Combat Employment for the Pacific Air Forces: Estimating the Impacts of Distributed Maintenance Postures on Sortie Rate Potential. Santa Monica: RAND Corporation, 2024. 86 p.
- [5.] Deptula D. A. Air Power in the 21st Century: Strategic and Operational Challenges. Mitchell Institute for Aerospace Studies. Arlington, VA, 2023. 74 p.
- [6.] NATO Joint Air Power Competence Centre (JAPCC). Transforming Joint Air Power: The Case for Distributed Operations and ACE. JAPCC Journal. Kalkar: Germany, 2023. Vol. 32. P. 12–24.
- [7.] Shlapak D. A. Air and Missile Defense in a High-Intensity Conflict: Implications for Force Design. RAND Corporation. Santa Monica, 2024. 52 p.
- [8.] Openko P., Pidhorodetskyi M., Saliy A., Saliy O. 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 of Materials and Theory of Structures. №110. Kyiv, 2023. P. 375-392.
- [9.] Dyptan V., Yablonsky P., Avramenko O., Klymchuk V., Openko P., Polishchuk V. Reliability Assessment of Highly Reliable Samples Using the Tolerance Limits and the Weibull's Law. Advances in Computer Science for Engineering and Education: Springer, 2022. P. 53–64.10.
- [10.] Поліщук В.В., Салій А.Г., Целішев Ю.П. та інші. Обґрунтування математичної моделі функціонування системи відновлення автомобільної і спеціальної техніки Повітряних Сил в умовах швидкої зміни обстановки. Науково-практичний журнал «Повітряна міць України». Київ: НВОУ, 2022. С. 61–64. [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)

[11.] Avramenko, O.V., Matsko, O.Y., Polishchuk, V.V., Pidhorodetskyi, M.M., Salii, A.H., Salii, O.Y., Korshets, O.A., & Duzhyi, R.V. Determination of the optimal technical servicing periodicity of samples of

aerodrome construction equipment. *Strength of Materials and Theory of Structures*. №107. Kyiv, 2021. P. 265-280.

**Oleksandr Derikot**

<https://orcid.org/0000-0002-5985-3249>

**Oleksandr Khlypavka**

<https://orcid.org/0009-0006-3298-0623>

**Vasyl Polishchuk** (candidate of military sciences, associate professor)

<https://orcid.org/0000-0001-8990-9648>

*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## ANALYSIS OF THE ACTIVITIES OF AIR FORCE CAPABILITY COALITIONS AND INTEGRATED AIR AND MISSILE DEFENSE WITHIN THE FRAMEWORK OF INTERNATIONAL MILITARY COOPERATION DURING THE REPELLING OF ARMED AGGRESSION

*The article provides a comprehensive analysis of the activities of international Air Force capability coalitions and the functioning mechanisms of the Integrated Air and Missile Defense (IAMD) system in the context of repelling full-scale armed aggression. The relevance of the study is driven by the need to transform the national air defense system through the introduction of high-tech Western-made weaponry and its full integration into the unified information and coordination space of the Defense Forces.*

*The authors examine the structure and principles of interaction within specialized "capability coalitions," specifically in the aviation and air defense sectors. The work emphasizes interoperability issues based on the implementation of advanced standards and real-time data exchange systems. The research methodology is grounded in a systemic analysis of logistics supply processes, the specifics of maintenance for foreign equipment, and personnel training under conditions of high uncertainty.*

*The main result of the study is the substantiation of a multi-layered, echeloned defense model that allows for the optimization of limited ammunition use and increases the interception efficiency across a wide range of aerial targets. The practical significance of the findings lies in the possibility of their implementation into the work of military command and control bodies to improve logistics planning and the combat employment of the Air Force. The results obtained can serve as a basis for the development of automated decision support systems in the field of collective security and airspace defense.*

*The application of the analysis results ensures informed decision-making regarding the further development of the air defense architecture, optimization of personnel training, and improvement of the maintenance system for foreign equipment. Practical testing of the findings confirms that coordination within specialized coalitions (e.g., the "Aviation Coalition" and "Air Defense Coalition") significantly shortens the supply cycle for critical equipment and increases the aerial target interception rate.*

**Keywords:** *international military cooperation; Air Force; integrated air and missile defense (IAMD); capability coalition; interoperability; military aid; air traffic management; missile defense.*

### References

- [1.] Bronk J., Watling J. *The Russian Air War and Ukrainian Air Defence: November 2022–July 2023*. Royal United Services Institute (RUSI). London: RUSI Publishing, 2023. 48 p.
- [2.] Jones S. G., McCabe R., Williams I. *Air and Missile Defense: The Role of Integrated Systems in Modern Warfare*. Center for Strategic and International Studies (CSIS). Washington, DC: CSIS, 2023. 92 p.
- [3.] Karako T., Williams I. *Ukraine's Air and Missile Defense: Lessons for the Future*. Center for Strategic and International Studies (CSIS). Washington, DC, 2024. 112 P.
- [4.] Lynch K. F., Castle R., Drew J. G., et al. *Assessing Agile*

- Combat Employment for the Pacific Air Forces: Estimating the Impacts of Distributed Maintenance Postures on Sortie Rate Potential. Santa Monica: RAND Corporation, 2024. 86 p.
- [5.] Deptula D. A. Air Power in the 21st Century: Strategic and Operational Challenges. Mitchell Institute for Aerospace Studies. Arlington, VA, 2023. 74 p.
- [6.] NATO Joint Air Power Competence Centre (JAPCC). Transforming Joint Air Power: The Case for Distributed Operations and ACE. JAPCC Journal. Kalkar: Germany, 2023. Vol. 32. P. 12–24.
- [7.] Shlapak D. A. Air and Missile Defense in a High-Intensity Conflict: Implications for Force Design. RAND Corporation. Santa Monica, 2024. 52 p.
- [8.] Openko P., Pidhorodetskyi M., Salii A., Salii O. 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 of Materials and Theory of Structures. №110. Kyiv, 2023. P. 375-392.
- [9.] Dyptan V., Yablonsky P., Avramenko O., Klymchuk V., Openko P., Polishchuk V. Reliability Assessment of Highly Reliable Samples Using the Tolerance Limits and the Weibull's Law. Advances in Computer Science for Engineering and Education: Springer, 2022. P. 53–64.10.
- [10.] Polishchuk, V. V., Salii, A. H., Tselishev, Y. P., et al. (2022). Obhruntuvannia matematychnoi modeli funktsionuvannia systemy vidnovlennia avtomobilnoi i spetsialnoi tekhniky Povitrianykh Syl v umovakh shvydkoi zminy obstanovky [Substantiation of a mathematical model for the functioning of the Air Force automotive and special vehicle recovery system in a rapidly changing environment]. Povitriana Mit Ukrainy [Air Power of Ukraine], Kyiv: NDUU, 61–64.
- [11.] Avramenko, O.V., Matsko, O.Y., Polishchuk, V.V., Pidhorodetskyi, M.M., Salii, A.H., Salii, O.Y., Korshets, O.A., & Duzhyi, R.V. Determination of the optimal technical servicing periodicity of samples of aerodrome construction equipment. Strength of Materials and Theory of Structures. №107. Kyiv, 2021. P. 265-280.

### 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. Розвиток та оперативне мистецтво Повітряних Сил.
2. Бойове застосування родів військ (сил) повітряної компоненти.
3. Моделювання операцій та бойових дій у повітряному просторі.
4. Розвиток засобів повітряного нападу та протидії їм.
5. Розвиток застосування пілотованої та безпілотної авіації.
6. Міжвидова взаємодія в операціях Сил оборони.
7. Логістичне забезпечення та підтримка дій повітряної компоненти.
8. Живучість військ та безпека застосування родів військ повітряної компоненти.
9. Запобігання надзвичайним ситуаціям терористичного та техногенного характеру, що пов'язані з діяльністю організаційних структур повітряної компоненти.
10. Аналіз бойового досвіду та повітряних операцій.
11. Технології переваги в повітрі.
12. Розвиток форм і методів підготовки родів військ (сил) повітряної компоненти

### Подання матеріалів

Обсяг рукопису – від 4 до 10 аркушів українською або англійською мовами.

Для публікації необхідно надіслати статтю у електронній формі (**docx**).

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: iappo.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.

<sup>1</sup>**Полуботок Павло Леонтійович** (д-р техн. наук, професор)

← (кегль – 11 та 8 пт.)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

← (кегль – 10 пт.)

<sup>2</sup>**Острозький Костянтин Іванович** (канд. техн. наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

← 1 пустий рядок – 6 пт.

<sup>1</sup>**Університет..., Київ, Україна**

<sup>2</sup>**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:** поняття 1; поняття 2; поняття 3. (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, методику 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. Свєргун, 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. Мірошниченко 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 псевдозрідженому 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](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-p#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](https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Energy_Optimization_of_a_Laser-Powered_Hovering-UAV_Relay_in_Optical_Wireless_Backhaul/17087309)

#### **Патент**

- [14] Двовахільна 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-bronovanikhmashin.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->

[sylysluzhbovym-spravam-osvity-dlya-zabezpechennya-protsvitannya-molodoyiukrayinskoyi-derzhavy-z-nagody-150-richchya-vid-dnya-narodzhennyamykoly-prokopovycha-vasylenka-1866-1935/#GmediaGallery\\_101-3810](http://sylysluzhbovym-spravam-osvity-dlya-zabezpechennya-protsvitannya-molodoyiukrayinskoyi-derzhavy-z-nagody-150-richchya-vid-dnya-narodzhennyamykoly-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 (співавторів), 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

**Лапки:** використовуйте тільки англійську розкладку

*Не використовуйте для форматування тексту пропуски, табуляцію тощо. Не встановлюйте ручне перенесення слів, не використовуйте колонтипули. 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 вчитана 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:

← 1 пустий рядок – 6 пт.

$A = \pi r^2$	(1)
---------------	-----

← 1 пустий рядок – 6 пт.

де $r$	–	радіус кола
--------	---	-------------

← 1 пустий рядок – 6 пт.

Розмір шрифту 10 пт, підрядковий та нарядковий 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.

← 1 пустий рядок – 6 пт.

Таблиця 1

Назва таблиці		
Текст	Текст	Текст
Текст	Текст	Текст

← 1 пустий рядок – 6 пт.

Рисунки **обов’язково** супроводжуються центрованими підрисунковими підписами (кегель – 10).

← 1 пустий рядок – 6 пт.



**Рисункок 1** – Назва рисунку

← 1 пустий рядок – 6 пт.

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 підрисунковими підписами (кегель – 10).

**Не допускаються** кольорові та фонові рисунки.

Допускається розташування великих рисунків, формул та таблиць в одну колонку (до 16 см.)

<sup>1</sup>**Pavlo Polubotok** (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

<sup>2</sup>**Kostyantyn Ostrogski** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

<sup>1</sup>*University..., Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*Institute..., Kyiv, Ukraine*

## ARTICLE TITLE

*Translation of the abstract and keywords. Translation of the abstract and keywords*

Після цього наводиться переклад списку використаних джерел **References** англійською мовою згідно з IEEE style (9 кегль)