



ПОВІТРЯНА МІЦЬ УКРАЇНИ

науково-практичний журнал
інституту авіації та протиповітряної оборони
Національного університету оборони України



2 (7)
2024



ПОВІТРЯНА МІЦЬ УКРАЇНИ

№ 2 (7)
2024

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: iapro.ndl@gmail.com
електронна версія журналу:
sap.nuou.org.ua

Журнал зареєстровано в
Міністерстві юстиції України
(Свідоцтво
КВ № 24979-14919P)
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
видав України, в яких
можуть публікуватися
результати дисертаційних
робіт на здобуття наукових
ступенів доктора наук,
кандидата наук та ступеня
доктора філософії (Наказ
Міністерства освіти і науки
України № 220 від 21.02.2024
"Про затвердження рішень
атестаційної комісії
Міністерства освіти і науки
України від 21.02.2024")

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

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

Рекомендовано до друку
Вченою радою Національного
університету оборони України
(протокол
№ 14 від 09 грудня 2024 року)

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

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

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОВІТРЯНИХ СИЛ УКРАЇНИ, УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	5
Вплив руху складових радіолокаційного каналу на параметри відбитого сигналу РЛС при локації повітряних цілей у тропосферному радіохвилеводі над морем (<i>Олещук М. М.</i>).....	5
Визначення сукупності показників для оцінювання ефективності функціонування системи управління угруповання радіотехнічних військ (<i>Попов С. Е., Пуховий О. В., Юфа Є. А.</i>).....	11
Математичне моделювання навантаження пружного БПЛА на посадці (<i>Онищенко В. М., Спіркін Є. В., Яценюк В. Ж., Отрешико Н. М.</i>).....	18
Фактори, що впливають на ефективність системи ситуаційної обізнаності з урахуванням інформації від безпілотних авіаційних комплексів в операції угруповання Об'єднаних сил (<i>Луцкеят О. І., Волошин І. І., Ярошенко Я. В., Роговець О. В.</i>).....	24
Порівняльний аналіз застосування двопараметричного та трипараметричного законів розподілу Вейбулла для прогнозування показників безвідмовності військової авіаційної техніки (<i>Коцюруба А. В., Радько О. В., Бочарніков В. П., Пустовий С. О.</i>).....	31
Методика визначення важливості об'єктів протиповітряної оборони в процесі планування операцій з використанням методу факторного аналізу (<i>Горбенко В. М., Кіресенко В. В.</i>).....	36
Математична модель комплексної протидії безпілотним літальним апаратам (<i>Чернега В. М., Гудима О. П., Плахотний В. М., Плахотна М. М.</i>).....	43
ПИТАННЯ БОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН ТА ПІДРОЗДІЛІВ ДЕРЖАВНОЇ АВІАЦІЇ УКРАЇНИ, ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ, РАДІОТЕХНІЧНИХ ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК, ЗВ'ЯЗКУ, РАДІОТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ	50
Загальні підходи до оцінювання ефективності протиповітряної оборони з урахуванням застосування FPV-дронів-перехоплювачів (<i>Печененко О. М., Ярошенко Я. В., Елискун О. Є.</i>).....	50
Парадигма інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання (<i>Махно Є. П., Руденко Є. Г., Шапран О. О., Артюшин Л. М.</i>).....	55
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПЛОТОВАНОЇ ТА БЕЗПЛОТНОЇ АВІАЦІЇ	61
Вибір показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних безпілотних літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей (<i>Шоакошицний І. І., Василенко О. А.</i>).....	61
Психофізіологічні особливості операційно-інструментальної діяльності оператора безпілотного авіаційного комплексу мультиторного типу (І класу) (<i>Медведєв В. К., Корон С. В.</i>).....	73
Підхід до формування колективних задач при груповому застосуванні безпілотної авіації (<i>Мартинюк О. Р., Медведєв В. К.</i>).....	80
ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ	87
Рекомендації щодо підвищення ефективності відновлення озброєння та військової техніки угруповання зенітних ракетних військ (<i>Глоба О. В., Мельниченко В. С., Скиба А. М.</i>).....	87
ПИТАННЯ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН (ПІДРОЗДІЛІВ) ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ	96
Визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування системи пожежної сигналізації та оповіщення на військових об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження) (<i>Авраменко О. В., Сарайн Ю. О., Яблонський П. М., Федоров О. В.</i>).....	96
ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	106
Дослідження надійності радіоелектронних систем повітряних суден (<i>Мельник В. В., Гончаренко Є. В.</i>).....	106
Схема оформлення статей	114

Редакційна колегія

Головний редактор

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

Заступник головного редактора

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

Члени редколегії:

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

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

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

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

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

МІЩЕНКО Андрій Віталійович
доктор технічних наук, професор
ORCID: [0000-0001-8376-1777](https://orcid.org/0000-0001-8376-1777)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Технічний редактор

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

AIR POWER OF UKRAINE

№ 2 (7)
2024

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. Povitryanykh Syl, 28,
Kyiv, 03049
Telephone: (044)-271-05-88,
(050)-981-49-83
e-mail: iappo.ndl@gmail.com
on-line version of journal:
sap.nuou.org.ua

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

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

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

The journal is published in
Ukrainian and English
twice a year

Recommended for publication
by the Scientific Council
of the National Defence
University of Ukraine
(protocol
№ 14 from December, 09, 2024)

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

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

THE UKRAINIAN AIR FORCES DEVELOPMENT, APPLICATION AND PROVISION ISSUES, IMPROVEMENT OF THEIR COMMAND AND CONTROL SYSTEM	5
The Influence of the Movement of the Components of the Radio Location Channel on the Parameters of the Reflected Radar Signal in the Location of Air Targets in the Tropospheric Radio Waveguide over the Sea (<i>M. Oleshchuk</i>).....	5
Definition of the Set of Indicators for Assessing the Efficiency of the Functioning of the Management System of the Group of Radiotechnical Troops (<i>S. Popov, O. Pukhovy, Y. Yufa</i>).....	11
Mathematical Modeling of the Load Flexible UAV on Landing (<i>V. Onishchenko, Y. Spirkin, V. Yashchenok, N. Otreshko</i>).....	18
The Factors Affecting of the Situation Awareness System Effectiveness Taking into Account Information from Unmanned Aviation Systems in the United Forces Group Operation (<i>O. Lutsevyat, I. Voloshyn, Y. Yaroshenko, O. Rohovets</i>).....	24
Comparative Analysis of the Application of Two-Parameter and Three-Parameter Weibull Distribution for Predicting Reliability Indicators of Military Aircrafts (<i>A. Kotsiuruba, O. Radko, V. Bocharnikov, S. Pustoyvi</i>).....	31
Method of Determining the Importance of Air Defense Objects in The Operations Planning Process Using The Method of Factor Analysis (<i>V. Horbenko, V. Kireienko</i>).....	36
Mathematical Model of Complex Counter-Defense Against Unmanned Aircraft (<i>V. Chernega, O. Gudyma, V. Plakhotny, M. Plakhotna</i>).....	43
THE STATE AVIATION OF UKRAINE, ANTI-AIRCRAFT, RADIO TECHNICAL AND SPECIAL TROOPS, RADIO ENGINEERING SUPPORT AND COMMUNICATION MILITARY UNITS COMBAT USE ISSUES	50
General Approaches to Assessing the Effectiveness of Air Defense with the Integration of FPV Interceptor Drones (<i>O. Pechenenko, Y. Yaroshenko, O. Blyskun</i>).....	50
Paradigm of Intellectualisation of Distance Learning System Administration (<i>Y. Makhno, Y. Rudenko, O. Shapran, L. Artiushin</i>).....	55
THE MANNED AND UNMANNED AVIATION COMMAND AND CONTROL AND APPLICATION PROCESSES RESEARCH	61
Selection of Indicators for Assessing the Effectiveness of the Use of Swarms of Striking Unmanned Aerial Vehicles to Defeat Non-Stationary Group Targets (<i>I. Shovkoshytnyi, O. Vasylenko</i>).....	61
Psychophysiological Features of an Operational and Instrumental Activity of an Operator of an Unmanned Aerial System of a Multitrotor Type (Class 1) (<i>V. Medvediev, S. Korop</i>).....	73
Ways to Increase the Efficiency of the Application of Subdivisions of Strike UAVs (<i>O. Martyniuk, V. Medvedev</i>).....	80
THE UKRAINIAN AIR FORCES BRANCHES LOGISTIC SUPPORT DEVELOPMENT ISSUES	87
Recommendations for the Weapons and Military Techniques Recovery Efficiency Improving for Anti-Aircraft Missile Forces (<i>O. Hloba, V. Melnychenko, A. Skyba</i>).....	87
THE ISSUES OF PREVENTION OF EMERGENTIES OF A TERRORIST AND TECHNOGENIC NATURE RELATED TO THE ACTIVITIES OF MILITARY UNITS OF THE AIR FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE	96
Determination of the Optimum Periodicity of Maintenance of the Fire Alarm System and Notification at Military Storage Facilities of Ammunition (Aviation Attack Means) (<i>O. Avramenko, Y. Sarapin, P. Yablonskyi, O. Fedorov</i>).....	96
INNOVATIVE PROCESSES IN THE FIELDS OF AVIATION, AUTOMOTIVE, RADIO ELECTRONICS, RADIO ENGINEERING, COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS, AS WELL AS INFORMATION TECHNOLOGIES	106
Analysis of the Reliability Assessment Methods for Onboard Radio Electronic Equipment (<i>V. Melnyk, Y. Honcharenko</i>).....	106
Paper template	114

Editorial Board

Chief Editor

Yurii KRAVCHENKO

Doctor of Technical Sciences, professor

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

Deputy Editor

Serhii KOROTIN

Candidate of Technical Sciences, associate professor

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

Editorial Board Members:

Oleksandr AVRAMENKO

Doctor of Technical Sciences, associate professor

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

Yevhen HAVRYLKO

Doctor of Technical Sciences, professor

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

Oleh ZEMLIANSKYI

Doctor of Technical Sciences, associate professor

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

Tymur KURTSEITOV

Doctor of Technical Sciences, professor

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

Valentyna LOBOICHENKO

Doctor of Technical Sciences

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

Andriy MISHCHENKO

Doctor of Technical Sciences, professor

ORCID: [0000-0001-8376-1777](https://orcid.org/0000-0001-8376-1777)

Rustam MURASOV

Candidate of Technical Sciences, professor

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

Pavlo OPENKO

Candidate of Technical Sciences, senior researcher

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

Maksym TYSHCHENKO

Candidate of Technical Sciences, senior researcher

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

Anatolii SALII

Candidate of Military Sciences, professor

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

Volodymyr HERASIMENKO

Doctor of Military Sciences

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

Zdzisław SLIWA

Doctor of science (Hab.)

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

Serhii BAZILO

PhD in Military Science

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

Yurii KOLOMIETS

PhD in Technical Science

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

Oleksii MARTYNIUK

Candidate of Technical Sciences, associate professor

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

Mykola MIRONYUK

candidate of military sciences

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

Dmytro RIEZNIK

Candidate of Military Sciences, associate professor

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

Technical Editor

Oleksiy MAYSTROV

Candidate of Technical Sciences, associate professor

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

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

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-5-10

УДК 355.623

Олещук Микола Миколайович (кандидат технічних наук)
<https://orcid.org/0009-0002-9233-9679>

Повітряні Сили Збройних Сил України, Вінниця, Україна

ВПЛИВ РУХУ СКЛАДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО КАНАЛУ НА ПАРАМЕТРИ ВІДБИТОГО СИГНАЛУ РЛС ПРИ ЛОКАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ У ТРОПОСФЕРНОМУ РАДІОХВИЛЕВОДІ НАД МОРЕМ

Місцеві метеорологічні умови над акваторією та в прибережних районах внутрішніх морів та інших великих водойм можуть призводити до великих вертикальних градієнтів коефіцієнту заломлення повітря і, як наслідок, появи тропосферних радіохвильоводів, які, в свою чергу, змінюють умови локації повітряних цілей. У статті проведено аналіз впливу складових радіолокаційного каналу на параметри відбитого сигналу радіолокаційної станції при локації повітряних цілей у тропосферному радіохвильоводі над морем. Уточнено властивості ланок радіолокаційного каналу та оцінено показники якості функціонування радіотехнічної системи. Проведений аналіз показав, що відбиті сигнали від повітряних цілей, які рухаються у багатопроменевих тропосферних радіохвильоводах з різними швидкостями за різними траєкторіями, флюктують у залежності від параметрів руху повітряної цілі, характеристик тропосферного радіохвильоводу та параметрів зондувальних сигналів. Типові флюктуації відбитих сигналів повітряних цілей в тропосферному радіохвильоводі є комбінованими: повільними “незалежними від імпульсу до імпульсу” та швидкими; повільними “дружніми” та швидкими; повільними “незалежними від імпульсу до імпульсу” та повільними “дружніми”; повільними “незалежними від імпульсу до імпульсу”, повільними “дружніми” та швидкими. Оскільки флюктуації відбитих сигналів погіршують показники якості виявлення та вимірювання координат повітряних цілей в тропосферному радіохвильоводі над морем, то для їх зменшення необхідно мати можливість вибору параметрів зондувальних сигналів, які залежать від характеристик тропосферного радіохвильоводу та методів обробки відбитих сигналів в радіолокаційній станції. Отримані результати можуть бути корисними розробникам та експлуатантам радіолокаційних станцій, що розташовуються в прибережних районах.

Ключові слова: радіолокаційний канал, радіолокаційна станція, повітряна ціль, тропосферний радіохвильовід.

Вступ

Радіолокаційні станції за класифікацією [1] відносяться до активних радіотехнічних систем (РТС) здобування інформації. Узагальнена схема такої РТС наведена на рис. 1. Уточнюючи властивості ланок радіолокаційного каналу (РЛК) вдається оцінювати показники якості функціонування РТС, вибирати їх оптимальні параметри і визначати напрями вдосконалення РТС [2].

Параметри елементів 1, 2, 6 та 7 рисунку 1 відомі із малим ступенем невизначеності (майже повністю відомі).

Параметри елементу 4 є невідомими, але знаходяться в певному обмеженому інтервалі, з урахуванням припущень про який будується РТС.

Ступень невизначеності параметрів елементів 5 та 6 займає проміжне положення між “невідомі” та

“повністю відомі”. В залежності від можливості апріорі отримати інформацію про параметри елементів 5 та 6 решта невизначеності переноситься на елемент 4, що є поганим з боку отримання його об’єктивних характеристик.

Для наземних РЛС радіотехнічних військ (РТВ) об’єктами, що досліджується, є повітряні цілі (ПЦ) різних типів, а середовищем поширення радіохвиль є тропосфера, яка вважається однорідною та ізотропною. В переважній більшості випадків такі припущення є адекватним, але при локації ПЦ над морем та в прибережних районах така модель може бути недостатньою для пояснення ефектів, що спостерігаються [3, 4, 5, 6, 7]. Швидка зміна вологості повітря із висотою над поверхнею води може призводити до появи частин простору із аномально малим погонним згасанням радіохвиль – тропосферним радіохвильоводам (ТРХ).

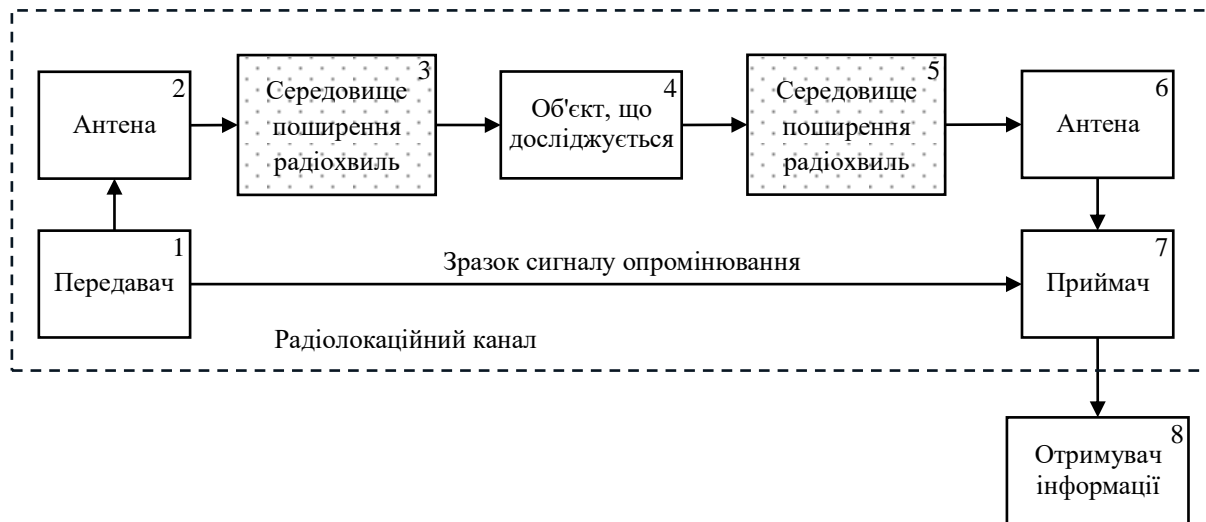


Рисунок 1. Узагальнена схема активної РТС здобування інформації

Виникнення ТРХ призводить до перерозподілу енергії випромінювання РЛС у просторі, що викривляє її зону виявлення, призводить до додаткової флуктуації відбитих сигналів [8] та змінює показники якості виявлення цілей, тому для правильної інтерпретації прийнятих РЛС сигналів необхідно мати відповідні моделі ТРХ.

Матеріали та методи

Дослідженню впливу ТРХ на роботу РЛС присвячено багато експериментальних та теоретичних робіт [3, 4, 7, 9, 10, 11], що дозволило розробити певні моделі ТРХ [12, 13].

Але в цих роботах вважалося, що всі елементи РЛК в ТРХ є статичними, тобто положення ПЦ,

антени РЛС, стінок ТРХ є фіксованими у якийсь момент часу.

Це є певною ідеалізацією явищ, що спостерігаються, і накладає обмеження на створені моделі.

Метою статті є аналіз впливу руху складових РЛК на параметри відбитого сигналу РЛС при локації ПЦ у ТРХ над морем.

Результати

Схематично процес поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ) у ТРХ під час локації ПЦ можливо представити у вигляді, який наведено на рис. 2.

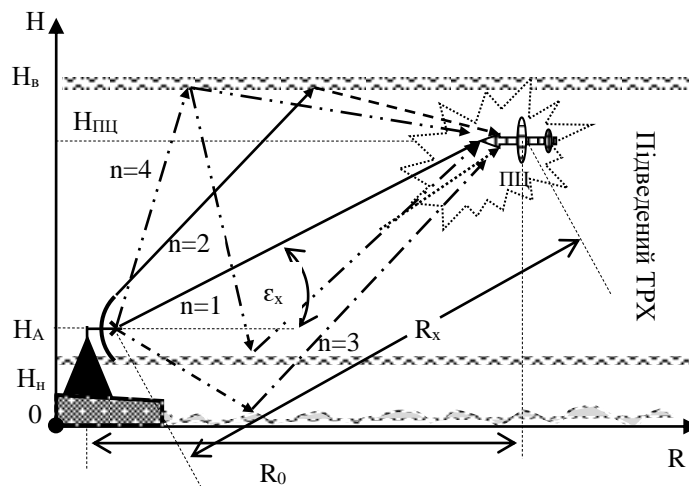


Рисунок 2. Оптична модель багатопроменевого поширення ЕМХ у ТРХ

РЛС, яка знаходиться на узбережжі і має висоту підйому антени H_A , виявляє ПЦ під кутом ϵ_x на висоті $H_{ПЦ}$ та похилій дальності R_x в середині підведеного ТРХ із висотою верхньої та нижньої стінок H_B та H_n відповідно. Також на рис. 2 наведені можливі шляхи поширення ЕМХ від РЛС до ПЦ та в зворотному напрямку.

Оцінимо вплив руху ПЦ, антени РЛС, хвилювання поверхні моря та руху стінок

тропосферного хвилеводу на характеристики ТРХ як елементу РЛК.

Експериментально отримати множину просторових реалізацій відбитих сигналів ПЦ, що рухаються у ТРХ, важко. Тому, зазвичай, можна використовувати множину їх часових реалізацій, траєкторію руху і швидкість ПЦ. При цьому передбачається, що часові та просторові реалізації електромагнітного поля ергодичні, а ПЦ рухаються за простою траєкторією.

Припустимо, що ПЦ рухається прямолінійно зі швидкістю $V_{ПЦ} = V$. У цьому випадку, кореляційна функція випадкового електромагнітного поля, що рухається у просторі, буде зводитися до обчислення кореляції для випадкової ЕМХ $U(r+Vt)$ в різні моменти часу й у різних точках простору при $V=V(r,t)=const$.

Просторово-часова функція кореляції ЕМХ визначається виразом [14]:

$$\overline{\{U(r_1+Vt_1)U(r_2+V(t+\tau))\}} = \psi(\Delta r + V\tau), \quad (1)$$

де $\Delta r = r_2 - r_1$, у припущенні, що $U \neq 0$.

При виконанні умови часової ергодичності часове середнє (1) сходиться за $\tau \rightarrow \infty$ в ймовірнісному сенсі до свого статистичного середнього, тобто до функції автокореляції.

Аналогічно, функцію автокореляції можна знайти шляхом просторового усереднення. При цьому, зазначений добуток при усередненні вздовж прямої лінії має прагнути до статистичного середнього при збільшенні інтервалу усереднення.

Розглянемо питання про виконання умов часової й просторової ергодичності для функції автокореляції плоских ЕМХ, що рухаються, при усередненні у фіксовану місці простору на обмеженому часовому інтервалі $[0, T]$, а також при усередненні на обмеженому просторовому інтервалі $[0, L_{ТРХ}]$ у той же самий момент часу.

Достатньою умовою виконання теореми часової ергодичності [15] відносно кореляційної функції (1) є прагнення її до нуля при $T \rightarrow \infty$.

Якщо позначити функцію кореляції випадкової величини $\eta(V_t) = \overline{U(V_t)U(V(t+\tau))}$ у вигляді $\psi_\eta(V \times \tau_1)$, то:

$$\psi_\eta(V\tau_1) = \overline{[UV(t)] * [UV(t+\tau)]} \cdot \overline{[UV(t+\tau_1)] * [UV(t+\tau+\tau_1)]} - \psi^2(V\tau), \quad (2)$$

де (*) – операція згортання.

Спроможність часової оцінки (часової ергодичності) (2) зводиться до того, що має виконуватися умова [14, 15]:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \psi_\eta(V\tau_1) d\tau_1 = 0. \quad (3)$$

За прямолінійного руху цілі її швидкість має дві компоненти $V_x = V \cos \alpha$, $V_z = V \sin \alpha$, де α – кут між вектором \vec{V} і віссю x .

Значення часової функції кореляції у фіксованому місці простору має вигляд [14, 15]:

$$\begin{aligned} \overline{U(Vt)U(V(t+\tau))}_T &= \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U(V_x t, 0, V_z t) U(V_x (t+\tau), 0, V_z (t+\tau)) dt = \\ &= \frac{1}{V_x T} \int_0^{V_x T} \xi(x, 0, x \cdot tg \gamma) \xi(x + V_x \tau, 0, x \cdot tg \gamma + V_z \tau) dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Заміною $(V_x t) = x$ зроблено перехід від усереднення за часом до усереднення по прямій лінії x .

Слід знайти значення просторової функції автокореляції в той самий момент часу при усередненні вздовж лінії x , що збігається з напрямком швидкості переміщення цілі $L_x = L \cos \alpha$:

$$\begin{aligned} \overline{U(x)U(x+\Delta r)}_L &= \frac{1}{L} \int_0^L U(x, 0, z) U(x + \Delta r_x, 0, z + \Delta r_z) dx = \\ &= \frac{1}{L} \int_0^{L_x} U(x, 0, z(x)) U(x + \Delta r_x, 0, z(x) + \Delta r_z) \sqrt{1 + [z'(x)]^2} dx \times \\ &\times \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} U(x, 0, xtg \gamma) U(x + \Delta r_x, 0, xtg \gamma + \Delta r_z) dx. \end{aligned} \quad (5)$$

З (4) і (5) видно, що, якщо часовий інтервал усереднення обрати так, щоб виконувалися співвідношення $V_x T = L_x$, а просторове зміщення Δr_x , Δr_z зв'язати із часовим зміщенням τ співвідношеннями $V_x \tau = \Delta r_x$, $V_z \tau = \Delta r_z$, то можна констатувати еквівалентність часових і просторових значень функції кореляції ЕМХ випадкового поля, що рухається.

Отримані результати підтверджують гіпотезу Тейлора [14, 15]: щодо функції кореляції плоских ЕМХ випадкового поля, що рухаються, відповідно до якої часові спостереження флуктуацій ЕМХ дають інформацію про просторові кореляційні властивості ЕМХ вздовж напрямку руху.

Таким чином, визначення параметрів ТРХ при локації цілі, що рухається зі швидкістю $V_{ц}$ уздовж лінії візування може полягати у визначенні часової кореляційної функції нерухомого ТРХ без цілі, а потім необхідно вважати, що ТРХ рухається зі швидкістю $V_{ц}$.

Такий підхід можливо використовувати для будь якого відносного руху елемента ТРХ, як у радіальному так і тангенціальному напрямку.

Це дозволяє зробити висновок, про те, що відносний рух елементів багатопроменевих ТРХ приводить до флуктуацій зондувальних сигналів (ЗНС) та (або) відбитих сигналів від ПЦ. Параметри флуктуацій залежить від швидкості ПЦ, характеристик (пам'яті) ТРХ, параметрів ЗНС та швидкості сканування простору антеною РЛС.

Чинниками змін положення елементів тропосферного радіолокаційного каналу може бути:

- вітер у акваторії моря;
- швидкість обертання антени РЛС;
- зміна положення ПЦ у ТРХ відносно РЛС;
- швидкість руху цілі.

Виходячи з незалежності чинників сумарний вектор швидкості змін можна визначити як:

$$\vec{V}_\Sigma = \vec{V}_{втр} + \vec{V}_{ант} + \vec{V}_{ц}. \quad (6)$$

Без порушення узагальнення, \vec{V}_Σ можливо розглядати як:

$$\vec{V}_\Sigma = \vec{V}_\Sigma^h + \vec{V}_\Sigma^t, \quad (7)$$

де $|\vec{V}_\Sigma^h| = V_{\text{вітр}}^h + V_{\text{ант}}^h + V_{\text{ц}}^h$ та $|\vec{V}_\Sigma^t| = V_{\text{вітр}}^t + V_{\text{ант}}^t + V_{\text{ц}}^t$ – нормальна (радіальна) та тангенціальна (перпендикулярна) складові відносного руху елементів ТРХ відповідно.

Такий підхід дозволяє розглядати нормальні (радіальні) та тангенціальні складові вектору швидкості окремо.

Для оцінки флуктуацій відбитого сигналу проаналізовано швидкість вітру над акваторією Чорного моря [16], швидкості типових ПЦ [17], швидкості обертання антени та параметри ЗНС типових РЛС, що зведено до таблиць 1-3.

Для оцінки флуктуацій відбитих сигналів ПЦ спочатку, визначається середній час затримки між променями в ТРХ над Чорним морем, і отримуємо:

$$\tau_{\text{фл}} = \frac{|\overline{\Delta L_{\text{ТРХ}}}|}{V_p}, \quad f_{\text{фл}} = \frac{1}{\tau_{\text{фл}}}. \quad (8)$$

Таблиця 1

Швидкості ПЦ

Тип ПЦ	Максимальна швидкість, м/с	Розміри в радіальній площині, м	Розміри в тангенціальній площині, м
Орлан 10	41	1,8	3,1
Гранат-4	40	1,9	3,2
Тахион	36	0,61	2

Таблиця 2

Характеристики ЗНС та діаграм спрямованості типових РЛС

Тип РЛС	Частота обертання антени РЛС, об./хв.	Ширина діаграми спрямованості антени по азимуту, град.	Період повторення ЗНС, мс	Тривалість ЗНС, мкс	Несуча частота ЗНС, МГц
19Ж6	12	2	0,6	6	2900...3200
ПЗ7	6	1	1,3	1,7	2695...3115
П-18	6	8	2,7	6	150...170

Таблиця 3

Середні типові значення швидкості вітру над Чорним морем за травень - листопад

Час доби, год.	Середня швидкість вітру, м/с	Мінімальна швидкість вітру (95%), м/с	Максимальна швидкість вітру (95%), м/с
0...6	1,15	0,3	2,0
7...12	2,4	0,5	4,3
13...18	2,6	1,0	4,2
19...24	1,65	0,3	3,0

Вираз (8) дозволяє розрахувати $\tau_{\text{фл}}$ та $f_{\text{фл}}$ ЗНС у місті знаходження ПЦ при зміні швидкості вітру $\vec{V}_{\text{вітр}}$: $\tau_{\text{фл}}^{\text{сирп}} \approx 1$ с, $f_{\text{фл}}^{\text{сирп}} \approx 1$ Гц. Отримані значення періоду флуктуацій є набагато більшими за період повторення та тривалість зондувальних імпульсів РЛС, тому можна зробити висновок, що зміни швидкості вітру $\vec{V}_{\text{вітр}}$ можуть призводити (за класифікацією [18]) лише до повільної (“дружньої”) флуктуації імпульсів пачки відбитих сигналів ПЦ.

Період флуктуації сигналу через обертання антени можна знайти як:

$$\tau_{\text{фл}}^{\text{ант}} = \frac{|\overline{\Delta L_{\text{ТРХ}}}|}{V_{\text{ант}}} = \frac{60 |\overline{\Delta L_{\text{ТРХ}}}|}{2\pi R_{\text{ц}} n_{\text{ант}}}, \quad (9)$$

де $n_{\text{ант}}$ – швидкість обертання антени РЛС, об./хв.

В залежності від швидкості обертання антени РЛС $f_{\text{фл}}^{\text{ант}} = 1/\tau_{\text{фл}}^{\text{ант}} \approx 1,8..3,6$ кГц.

Порівнюючи отримані значення $\tau_{\text{фл}}^{\text{ант}}$ із періодом повторення та тривалістю зондувальних імпульсів РЛС, можна зробити висновок, що

обертання антени може призводити до “незалежної” ([18]) флуктуації імпульсів у пачці відбитих ПЦ у ТХВ сигналів.

Для отримання $\tau_{\text{фл}}^{\text{увід}}$ та $f_{\text{фл}}^{\text{увід}}$ в залежності від змін положення ПЦ і швидкості руху ПЦ $V_{\text{ц}}$ необхідно розрахувати частоту Доплера у кожному з L каналів багатоканальної за часом параметричної моделі ТРХ:

$$F_{\text{д}}^n = \frac{2V_{\text{ц}}^n}{\lambda}, \quad (10)$$

де $V_{\text{ц}}^n = \frac{L_n}{T_n}$.

Частота відбитого сигналу в кожному каналі багатопроменевої за часом параметричної моделі: $f_0^n = f_0 \pm F_{\text{д}}^n$.

Оскільки $f_0 \gg F_{\text{д}}^n$, то $\sum_{n=1}^N U_n(t) e^{j f_0^n t}$ є биття, що має середню частоту:

$$f_{\text{биття}}^{\text{д}} = f_{\text{макс}}^{\text{д}} - f_{\text{мін}}^{\text{д}} \approx 2f_0, \quad (11)$$

де $f_{\max}^D = f_0 \pm F_{D\max}^n$, $f_{\min}^D = f_0 \pm F_{D\min}^n$.

Порівнюючи значення f_{\max}^D та f_{\min}^D із періодом повторення та тривалістю зондувальних імпульсів РЛС, можна зробити висновок, що рух ПЦ з швидкістю $\bar{V}_{\text{ц}}$ може призводити до швидкої (“внутрішньоімпульсної” [18]) флуктуації кожного з імпульсів пачки відбитих сигналів ПЦ.

Вплив змін положення ПЦ у ТРХ розраховуються аналогічно впливу при зміні $\bar{V}_{\text{втр}}$ або зміні $\bar{V}_{\text{ант}}$ для ПЦ:

“Орлан-10”: $|\overline{\Delta L_{\text{ТРХ}}}| = 0,18 \text{ м}$, $\tau_{\text{фл}} = 4,5 \text{ мс}$,
 $f_{\text{фл}} = 222 \text{ Гц}$;

“Гранат-4”: $|\overline{\Delta L_{\text{ТРХ}}}| = 0,19 \text{ м}$, $\tau_{\text{фл}} = 4,7 \text{ мс}$,
 $f_{\text{фл}} = 213 \text{ Гц}$;

“Тахіон”: $|\overline{\Delta L_{\text{ТРХ}}}| = 0,17 \text{ м}$, $\tau_{\text{фл}} = 4,5 \text{ мс}$,
 $f_{\text{фл}} = 222 \text{ Гц}$.

Порівнюючи отримані значення $\tau_{\text{фл}}$ із періодом повторення та тривалістю зондувальних імпульсів РЛС, можна зробити висновок, що зміни положення ПЦ у ТРХ можуть приводити до “дружньої” (повільної) флуктуації імпульсів пачки відбитих від ПЦ сигналів.

Зміна ракурсу ПЦ також призводить до флуктуацій відбитого сигналу. Для уникнення таких флуктуацій необхідно, щоб ракурс цілі змінювався на кут $\Delta\Psi_{\text{рак}}$, що не перевищує величин:

$$\Delta\Psi_{\text{рак}} \ll \lambda/4l_{\text{макс}}, \quad \Delta\Psi_{\text{рак}} < \delta R/l_{\text{макс}}, \quad (12)$$

де $l_{\text{макс}}$ – максимальна відстань між відбиваючими центрами цілі,

δR – роздільна здатність ЗНС по дальності.

Обговорення

Співвідношення (12) дозволяє висунути вимоги до зв'язку флуктуації відбитого сигналу ПЦ та відносної швидкості змін ракурсу ПЦ та швидкості обертання антени РЛС.

Таким чином, зміна положення ПЦ з швидкістю $V_{\text{ц}}$ призводить до “незалежної” флуктуації імпульсів пачки відбитих сигналів і до “внутрішньоімпульсної” (швидкої) флуктуації кожного з імпульсів пачки відбитих сигналів ПЦ.

Висновки

Проведений аналіз показує, що відбиті сигнали від ПЦ, які рухаються у багатопроменевих ТРХ з різними швидкостями за різними траєкторіями, флуктують у залежності від параметрів руху ПЦ, характеристик ТРХ та параметрів ЗНС.

Типові флуктуації відбитих сигналів ПЦ в ТРХ є комбінованими:

повільними “незалежними від імпульсу до імпульсу” та швидкими;

повільними “дружніми” та швидкими;

повільними “незалежними від імпульсу до імпульсу” та повільними “дружніми”;

повільними “незалежними від імпульсу до імпульсу”, повільними “дружніми” та швидкими.

Оскільки флуктуації відбитих сигналів погіршують ефективність виявлення та

вимірювання координат ПЦ у ТРХ над морем, то для їх зменшення необхідно мати можливість вибору параметрів ЗНС, які залежать від характеристик ТРХ та методів обробки відбитих сигналів в РЛС.

Список використаних джерел

1. Гуткин Л. С. Современная радиоэлектроника и ее проблемы / Л. С. Гуткин. – М.: Сов. радио, 1968. – 104 с.
2. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / М. Е. Варганов, Ю. С. Зиновьев, Л. Ю. Астанин и др. ; под ред. Л. Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.
3. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
4. Кукушкин А. В. Загоризонтное распространение ультракоротких радиоволн над морем: Обзор. / Кукушкин А. В., Фрейлихер В. Д., Фукс И. М. // Известия вузов. Радиофизика, 1987. – Т. XXX. – №7. – С. 811-839.
5. Кабанов В. А. Структура коэффициента преломления атмосферы и диагностика условий распространения УКВ над морем / В. А. Кабанов. – Х.: ИРЭ АН УССР, 1996. – 161 с.
6. Жуков Б. В. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере / Б. В. Жуков, В. А. Кабанов, И. М. Мыщенко, В. Б. Синицкии, Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко; Под ред. Г. И. Хлопова. – Київ: Науково-виробниче підприємство “Видавництво “Наукова думка” НАН України”, 2010. – 264 с.
7. Лобкова Л. М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л. М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
8. Карлов В. Д. Точність вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів в умовах тропосферної рефракції / В. Д. Карлов, О. Л. Кузнецов, В. В. Белоусов, С. А. Тузіков, М. М. Олещук, В. М. Петрушенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – № 1(63). – С. 146-152.
9. Морская радиолокация / Под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.
10. Красюк Н. П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н. П. Красюк, В. Л. Коблов, В. Н. Красюк – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
11. Леушин С. Г. Експериментальні дослідження ненавмисних активних перешкод для причорноморського регіону, джерело яких знаходиться за межею радіогоризонту у дециметровому діапазоні хвиль / С. Г. Леушин, О. В. Бесова, М. М. Олещук // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – №1(67). – 2021. – С. 80–84. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.10>.
12. Карлов В. Д. Свойства морского тропосферного волновода как элемента радиоканала / В. Д. Карлов, В. Л. Мисайлов, Н. Н. Петрушенко // Системи обробки інформації. – Вип. 6(73). – 2008. – С. 54–58.
13. Леушин С. Г. Параметри причорноморських тропосферних радіохвильоводних каналів виявлення безпілотних літальних апаратів / С. Г. Леушин, О. В. Бесова, М. М. Олещук // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2021. – №1(42). – С. 99-103. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.42.12>.
14. Коростелев А. А. Пространственно-временная теория радиосистем / А. А. Коростелев – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
15. Чернов Л. А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями / Л. А. Чернов. – М.: Наука, 1975. – 171 с.
16. Архів погоди. Режим доступу: <https://www.meteoblue.com/uk/weather/historyclimate/weat>

herarchive

17. Кутовий О. П. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів / О. П. Кутовий // Наука і оборона. – 2000. – №4. – С. 39–47.

18. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

Mykola Oleshchuk (Candidate of Technical Sciences)
<https://orcid.org/0009-0002-9233-9679>

Air Force of the Armed Forces of Ukraine, Vinnytsia, Ukraine

THE INFLUENCE OF THE MOVEMENT OF THE COMPONENTS OF THE RADIO LOCATION CHANNEL ON THE PARAMETERS OF THE REFLECTED RADAR SIGNAL IN THE LOCATION OF AIR TARGETS IN THE TROPOSPHERIC RADIO WAVEGUIDE OVER THE SEA

Local meteorological conditions over the water area and in the coastal areas of inland seas and other large bodies of water can lead to large vertical gradients of the air refractive index and, as a result, the appearance of tropospheric radio waveguides, which change the location conditions of air targets. The article analyzes the influence of the components of the radar channel on the parameters of the reflected signal of the radar station when locating aerial targets in the tropospheric radio waveguide over the sea. The properties of the radar channel links were specified and the indicators of the quality of the functioning of the radio engineering system were evaluated. The conducted analysis showed that the reflected signals from air targets moving in multi-beam tropospheric radio waveguides at different speeds along different trajectories fluctuate depending on the parameters of the air target movement, the characteristics of the tropospheric radio waveguide and the parameters of the sounding signals. Typical fluctuations of the reflected signals of air targets in the tropospheric radio waveguide are combined: slow "independent from pulse to pulse" and fast; slow "friendly" and fast; slow "independent from pulse to pulse" and slow "friendly"; slow "independent from pulse to pulse", slow "friendly" and fast. Since the fluctuations of the reflected signals impair the quality indicators of detecting and measuring the coordinates of aerial targets in the tropospheric radio waveguide over the sea, to reduce them, it is necessary to be able to choose the parameters of sounding signals, which depend on the characteristics of the tropospheric radio waveguide and the methods of processing the reflected signals in the radar station. The obtained results can be useful to developers and operators of radars located in coastal areas.

Keywords: radar channel, radar station, air target, tropospheric radio waveguide.

References

1. Gutkin L. S. Sovremennaya radioelektronika i ee problemy / L. S. Gutkin. – M.: Sov. radio, 1968. – 104 s.
2. Radiolokatsionnye harakteristiki letatelnykh apparatov / M. E. Varganov, Yu. S. Zinovev, L. Yu. Astanin i dr. ; pod red. L. T. Tuchkova. – M.: Radio i svyaz, 1985. – 236 s.
3. Rasprostraneniye ultrakorotkiy radiovoln: Per. s angl. / Pod red. B. A. Shillerova. – M: Sov. radio, 1954. – 564s.
4. Kukushkin A. V. Zagorizontnoye rasprostraneniye ultrakorotkiy radiovoln nad morem: Obzor. / Kukushkin A. V., Freyliher V. D., Fuks I. M. // Izvestiya vuzov. Radiofizika, 1987. – T.HHH. – #7. – S.811
5. Kabanov V. A. Struktura koeffitsienta prelomleniya atmosfery i diagnostika usloviy rasprostraneniya UKV nad morem / V. A. Kabanov. – H.: IRE AN USSR, 1996. – 161 s.
6. Zhukov B. V. Diagnostika usloviy rasprostraneniya UKV v troposfere / B. V. Zhukov, V. A. Kabanov, I. M. Myitsenko, V. B. Sinitskii, G. I. Hlopov, S. I. Homenko; Pod red. G. I. Hlopova. – KiYiv: Naukovo-virobniche pIdpriEmstvo "Vidavnitstvo "Naukova dumka" NAN UkraYini", 2010. – 264s.
7. Lobkova L. M. Rasprostraneniye radiovoln nad morskoy poverhnostyu / L. M. Lobkova. – M.: Radio i svyaz, 1991. – 256s.
8. Karlov V. D. Tochnistj vymirjuvannja kutovykh koordynat aerodynamichnykh ob'ektiv v umovakh troposfernoj refrakciji / V. D. Karlov, O. L. Kuznjecov, V. V. Bjelousov, S. A. Tuzikov, M. M. Oleshchuk, V. M. Petrushenko // Systemy upravlinnja, navigacij i ta zv'jazku. – 2021. – # 1(63). – S. 146-152.
9. Morskaya radiolokatsiya / Pod red. V.I. Vinokurova. – L.:Sudostroenie, 1986. – 256s.
10. Krasjuk N. P. Vliyanie troposfery i podstilayushey poverhnosti na rabotu RLS / N. P. Krasjuk, V. L. Koblov, V. N. Krasjuk – M.: Radio i svyaz, 1988. – 216 s.
11. Leushyn S. Gh. Eksperymentaljni doslidzhennja nenavmysnykh aktyvnykh pereshkod dlja pryehornomorsjogho reghionu, dzherelo jakykh znakhodytsja za mezheju radioghoryzontu u decymetrovomu diapazoni khvylj / S. Gh. Leushyn, O. V. Bjesova, M. M. Oleshchuk // Zbirnyk naukovykh pracj Kharkivsjogho nacionaljnogho universytetu Povitrijanykh Syl. – #1(67). – 2021. – S. 80-84. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.10>.
12. Karlov V. D. Svojtva morskogho troposfernogho volnovoda kak elementa radyokanala / V. D. Karlov, V. L. Mysajlov, N. N. Petrushenko // Systemy obrobky informaciji. — Vyp. 6(73). – 2008. – S.54-58.
13. Leushyn S. Gh. Parametry pryehornomorsjkykh troposfernykh radiokhvylevodnykh kanaliv vyjavlennja bezpilotnykh litaljnykh apparativ / S. Gh. Leushyn, O. V. Bjesova, M. M. Oleshchuk // Nauka i tekhnika Povitrijanykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrajinj. – 2021. – #1(42). – S. 99-103. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.42.12>.
14. Korocylev A. A. Prostranstvenno-vremennaya teoriya radosistem / A. A. Korostylev – M.: Radio i svyaz, 1987. — 320 s/
15. Chernov L. A. Rasprostraneniye voln v srede so sluchaynymi neodnorodnostyami / L. A. Chernov. – M.: Nauka, 1975. – 171 s.
16. Arkhiv pohody. Rezhym dostupu: <https://www.meteoblue.com/uk/weather/historyclimate/weat-herarchive>
17. Kutovyi O. P. Tendentsii rozvytku bezpilotnykh litalnykh apparativ / O. P. Kutovyi // Nauka i obrona. – 2000. – №4. – S. 39-47.
18. Radioelektronnie sistemi: Osnovi postroeniya i teoriya. Spravochnik Izd. 2-e, pererab. i dop. / Pod red. Ya.D. Shirmana. – M.: Radiotekhnika, 2007. – 512 s.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-11-17

УДК 355.359(477)

Попов Сергій Едуардович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-7410-1267>

Пуховий Олександр Володимирович (кандидат військових наук, доцент)

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

Юфа Євген Агашович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-6362-5986>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ СУКУПНОСТІ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ УГРУПОВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВІЙСЬК

У статті визначено сукупність показників для оцінювання ефективності функціонування системи управління угруповання радіотехнічних військ під час бойового застосування. Використання зазначених показників дозволить: кількісно і якісно оцінити стан системи управління радіотехнічних військ та її готовність до виконання поставлених завдань; оперативно проводити корекцію планів та обґрунтовано приймати рішення щодо управління підпорядкованими силами і засобами; якісно здійснювати заходи з управління військами, що безумовно позитивно вплине на реалізацію їх бойових можливостей. Дослідження проведено з використанням відомих наукових методів, зокрема, аналізу та теорії ймовірностей, які дозволили описати основні процеси, що циркулюють в системі управління угруповання радіотехнічних військ. Матеріали статті можуть бути корисними для фахівців оперативної і тактичної ланок управління, які займаються питаннями удосконалення функціонування систем управління родів військ Повітряних Сил з метою підтримання їх постійної готовності до здійснення управління.

***Ключові слова:** радіотехнічні війська, система управління, показник ефективності, обґрунтованість, оперативність, відповідність, якість.*

Вступ

За останні роки та з початком розв'язання і ведення повномасштабної війни російської федерації проти України, відбулися значні зміни у підходах щодо застосування сил оборони держави, формах і способах ведення операцій (бойових дій) та їх всебічного забезпечення. Досвід виконання завдань силами і засобами протиповітряної оборони (ППО) під час ведення російсько-української війни показав, що радіотехнічні війська (РТВ) Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил (ЗС) України залишаються основним джерелом інформації про повітряну обстановку і складають основу системи розвідки та попередження про повітряного противника. Тому актуальним залишається питання щодо реалізації принципів бойового застосування, одними з основних яких є постійна бойова готовність, повне використання бойових можливостей та безперервність управління [1].

Реалізувати зазначені принципи, зокрема безперервного управління військами, можливо за умов ефективного функціонування системи управління (СУ) угруповання РТВ, яка розгортається і функціонує в єдиній системі управління силами і засобами угруповання ПС ЗС України під час підготовки та ведення операцій (бойових дій).

Управління угрупованням РТВ під час

бойового застосування полягає у цілеспрямованому впливі командувачів, командирів (начальників) усіх рівнів (стратегічного, оперативного, тактичного) на підпорядковані військові частини (підрозділи) РТВ, яке організовується і здійснюється з метою підтримання постійної бойової готовності військових частин (підрозділів) РТВ та ефективної реалізації бойових можливостей під час бойового застосування.

Досвід управління військами (силами) у ході російсько-української війни показав, що система управління угрупованням РТВ повинна мати високий рівень готовності до управління, забезпечувати можливість як централізованого, так і децентралізованого управління військами, а також відповідати вимогам, які висувуються до управління військами (силами) [2].

Отже, питання щодо підвищення ефективності функціонування СУ угруповання РТВ на сьогоднішній день залишається актуальним і потребує подальшого дослідження.

Матеріали та методи

Для оцінювання ефективності функціонування будь-якої складної системи військового призначення, у т. ч. і СУ угруповання РТВ, необхідно мати відповідний науково-методичний апарат.

Проведений аналіз існуючого науково-

методичного апарату оцінювання ефективності функціонування різних за цільовим призначенням СУ інших видів і родів військ (сил), їх всебічного забезпечення та інших складових сектору безпеки і оборони [3–12], показав, що зазначена у них сукупність показників не може бути використана у повному обсязі для оцінювання ефективності функціонування СУ угруповання РТВ через неврахування особливостей її побудови та функціонування під час бойового застосування радіотехнічних військ.

Отже, метою статті є визначення сукупності показників, використання яких забезпечить об'єктивне оцінювання ефективності функціонування СУ угруповання РТВ під час бойового застосування за рахунок врахування особливостей її побудови та функціонування.

Дослідження проведено з використанням відомих наукових методів, зокрема, аналізу та теорії ймовірностей, які дозволили об'єктивно описати основні процеси, що циркулюють в СУ угруповання РТВ під час бойового застосування.

Результати

Оцінювання ефективності функціонування будь-якої складної системи (у т. ч. і СУ військового призначення) здійснюється за відповідними показниками і критеріями [13–18].

Результат вирішення завдань СУ угруповань військ (сил) під час ведення операцій (бойових дій) можна оцінити таким якісним показником, як ефективність, під якою мається на увазі узагальнена властивість системи, яка характеризує ступінь її пристосованості до виконання поставлених перед нею завдань у заданих умовах обстановки [13, 14].

До показників ефективності функціонування СУ угруповання РТВ під час бойового застосування можна віднести [17, 18]:

показник обґрунтованості управління;

показник оперативності управління;

показник відповідності організаційно-штатної структури органів управління, пунктів управління, підрозділів зв'язку і автоматизації управління завданням, які покладаються на угруповання РТВ (далі – показник відповідності ОШС ОУ, ПУ, ПЗв і АУ СУ РТВ);

показник якості структури інформаційної мережі СУ.

Дослідження діяльності органів управління, військ (сил) щодо створення різних за цільовим призначенням СУ під час проведення навчань, виконання науково-дослідних робіт підтверджують, що показник обґрунтованості управління може бути визначений за допомогою показників важливості, достовірності, повноти, доступності та деталізації інформації, яка використовується органами управління під час підготовки та ведення операцій (бойових дій). У цілому, при створенні СУ значення цих показників залежать від порядку роботи органів управління, збору, обробки та відображення інформації [16–18].

Обґрунтованість, як показник ефективності СУ

військового призначення, має характеризувати будь-який орган СУ угруповання РТВ і визначатися ступенем наближення обраного рішення до оптимального. Обґрунтованість рішення при розгляді декількох (n) варіантів можна розрахувати за виразом:

$$K_{\text{обр}} = 1 - \exp\left(-\frac{P_1 \cdot T_n}{T_1}\right); \quad (1)$$

$$T_n = \sum_{i=1}^n T_i \cdot (-\ln(1 - P_n)) / P_1 = N_{\text{ріш}}^{\text{зар}} \cdot \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

де P_1 – ймовірність обґрунтування одного варіанту рішення щодо управління угрупованням РТВ;

P_n – ймовірність обґрунтування n -х варіантів рішень щодо управління угрупованням РТВ;

T_1 – час обґрунтування першого варіанту рішення щодо управління угрупованням РТВ;

T_i – час обґрунтування i -го варіанту рішення щодо управління угрупованням РТВ;

T_n – час обґрунтування n -х варіантів рішень щодо управління угрупованням РТВ;

$N_{\text{ріш}}^{\text{зар}}$ – загальна кількість обґрунтованих варіантів рішень щодо управління угрупованням РТВ.

Отже, якщо керівним складом органу управління визначено час формулювання рішення, то за виразом (1) можна визначити його обґрунтованість.

Оперативність – здатність СУ угруповання РТВ у відповідності до поставлених цілей і завдань, своєчасно формулювати і доводити до підпорядкованих органів управління, військових частин (підрозділів) РТВ відповідні управлінські рішення (завдання) щодо порядку бойового застосування військ та їх всебічного забезпечення. Показник оперативності управління ($K_{\text{опер}}$) визначається ймовірністю своєчасної реалізації функцій СУ, наявним і потрібним часом СУ.

Кількісно цей показник можна оцінити за наступним виразом [17]:

$$K_{\text{опер}} = 1 - \exp\left(-\frac{T_{\text{наяв}}}{T_{\text{потр}}}\right), \quad (3)$$

де $T_{\text{наяв}}$, $T_{\text{потр}}$ – наявний і потрібний час СУ угруповання РТВ відповідно.

Наявний час ($T_{\text{наяв}}$) СУ угруповання РТВ – час, який включає діяльність керівного складу органів управління, військових частин (підрозділів) РТВ в СУ від моменту постановки завдання до моменту прийняття рішення ($T_{\text{ріш}}$) на бойове застосування або його припинення у зв'язку із завершенням ведення операції (бойових дій).

Під час ведення операцій (бойових дій) наявний час СУ угрупованням РТВ буде залежати від результатів бойового застосування і визначатися як часовий відрізок між наступними ударами засобів повітряного нападу противника:

$$T_{\text{наяв}} = T_{\text{ріш}} + T_{\text{вик}}, \quad (4)$$

де $T_{\text{ріш}}$ – час, який витрачається керівним складом на етапі оцінювання обстановки та формулювання рішення на бойове застосування угруповання РТВ в операції (бойових діях);

$T_{\text{вик}}$ – час, який витрачається на виконання завдань угрупованням РТВ.

Потрібний час ($T_{\text{потр}}$) СУ угрупованням РТВ під час підготовки до бойового застосування буде визначатися: часом на підготовку вхідних даних щодо організації управління угрупованням РТВ; часом вироблення та обґрунтування структури СУ угруповання РТВ в оперативній побудові військ (сил); часом формулювання рішення на організацію та здійснення управління угрупованням РТВ; часом постановки завдань щодо організації і здійснення управління підпорядкованими військовими частинами (підрозділами) РТВ; часом побудови СУ угруповання РТВ та її готовності до здійснення управління.

Під час бойового застосування потрібний час визначається з урахуванням: часу приведення визначеного складу сил і засобів угруповання РТВ у готовність до виконання бойових (спеціальних) завдань; часом виконання завдань під час управління веденням радіолокаційної розвідки, видачі радіолокаційної інформації на старші, взаємодіючі та забезпечувані пункти управління; часу з відновлення порушеної системи управління; часу прийняття рішення на подальше бойове застосування.

У загальному вигляді потрібний час СУ угруповання РТВ, виходячи з обстановки, що склалася, може бути розрахований наступним виразом:

$$T_{\text{потр}} = T_{\text{збір}} + T_{\text{ріш}} + T_{\text{затв}} + T_{\text{пер}} + T_{\text{вик}}, \quad (5)$$

де $T_{\text{збір}}$ – час збору й обробки інформації для формулювання рішення щодо управління угрупованням РТВ;

$T_{\text{ріш}}$ – час, який витрачається керівним складом на етапі оцінювання обстановки та формулювання рішення щодо управління угрупованням РТВ;

$T_{\text{затв}}$ – час доведення даних обстановки та прийняття рішення щодо управління угрупованням РТВ старшим органом управління;

$T_{\text{пер}}$ – час формулювання та передачі управлінських рішень (завдань) до підпорядкованих військових частин (підрозділів)

РТВ;

$T_{\text{вик}}$ – час, який витрачається на виконання завдань з управління військами під час бойового застосування.

Сприятливий баланс часу забезпечується лише у тому випадку, якщо потрібний час не перевищує наявного. Чим більше різниця між наявним і потрібним часом, тим у більш вигідному положенні будуть знаходитися командир і штаб, тому що ця різниця є ні чим іншим, як резервом часу, що забезпечує можливість компенсувати непередбачені обставини, викликаних випадковістю й невизначеністю вхідних даних оперативного-тактичної обстановки, що склалася.

У тому випадку, коли потрібний час виявляється більшим від наявного, утворюється дефіцит часу, що не дозволяє виконати завдання СУ угруповання РТВ взагалі чи з тією якістю, яка б відповідала потребам.

Показник відповідності ОШС ОУ, ПУ, ПЗв і АУ СУ РТВ ($P_{\text{відп}}$), буде визначатися показниками витрат матеріальних і людських ресурсів, грошового забезпечення ($P_{\text{витр}}$) та показником “ефективність – вартість” щодо побудови СУ ($K_{\text{ев}}$).

До матеріальних витрат на побудову СУ належать: озброєння та військова техніка (ОВТ) РТВ, засоби матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) за видами забезпечення, засоби зв'язку і автоматизації.

Людські витрати визначаються згідно зі штатом радіотехнічних підрозділів, які входять до складу угруповання РТВ.

Грошове забезпечення визначається статтями фінансового постачання згідно зі штатом особового складу та озброєння.

Матеріальні та людські витрати СУ кількісно характеризують обмеження, які враховуються в сільовій моделі підтримки рішення на бойове застосування угруповання РТВ.

Отже, ресурси, що виділяються на побудову СУ, будуть обмежені її штатом, кількістю ОВТ, засобів зв'язку і автоматизації, наявністю запасів МТЗ, витратою енергоресурсів та ін. Ці обмеження визначаються відповідними нормативними документами щодо оперативної побудови та застосування військ і розраховуються на кожному часовому інтервалі за етапами побудови системи управління.

Показник відповідності ОШС ОУ, ПУ, ПЗв і АУ СУ РТВ кількісно можна оцінити за наступним виразом [17, 18]:

$$P_{\text{відп}} = \sum_{i=1}^3 [1 - P_{\text{ивитр}}(K_{\text{івідп}} < K_{\text{ішт}})], \quad (6)$$

де $P_{\text{івідп}}(K_{\text{івідп}} < K_{\text{ішт}})$ – ймовірність того, що в результаті побудови СУ угруповання РТВ неочікуваний розмір витрат матеріальних ресурсів ($i = 1$), людських ресурсів ($i = 2$) і грошового забезпечення ($i = 3$) буде менше, ніж той, який

вимагається штатом.

Фізичний зміст зазначеного показника, як ступінь відповідності, відображає динаміку відповідності ОШС ОУ, ПУ, ПЗв і АУ СУ РТВ з урахуванням витрат, що реалізуються, на кожному етапі її побудови.

Межа інтервалів значень показників витрат матеріальних і людських ресурсів та грошового забезпечення ($K_{\text{витр}}$) визначається методом експертних оцінок для умов, які досліджуються.

Отже, зазначені показники складають основу для оцінювання відповідності ОШС ОУ, ПУ, ПЗв і АУ СУ бойовому завданню угруповання РТВ.

Показник “ефективність – вартість” СУ угруповання РТВ ($K_{\text{ев}}$) буде визначається через показник досягнення мети бойового застосування угруповання РТВ:

$$K_{\text{ев}} = [1 - P(E_6 < E_b)] \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{C}{C_0}\right) \right], \quad (7)$$

де $1 - P(E_6 < E_b)$ – показник досягнення мети бойового застосування угруповання РТВ (визначається шляхом моделювання бойових дій);

C – вартість СУ угруповання РТВ, яка запропонована;

C_0 – вартість СУ угруповання РТВ, яка вимагається, з урахуванням коефіцієнта пропорційності для прогнозування показника “ефективність – вартість” перспективної СУ угруповання РТВ.

Аналіз визначення показника “ефективність – вартість” з економічної точки зору показує, що економічною буде та СУ угруповання РТВ, яка побудована за ієрархічним принципом і вимагає швидкого реагування на зміну обстановки в нижчих ланках управління з урахуванням можливості само реагування, необхідності зменшення команд у верхніх ланках управління та узагальнення інформації [17].

Показник якості структури інформаційної мережі ($P_{\text{сім}}$) СУ угруповання РТВ буде визначатися складністю структури інформаційної мережі СУ ($K_{\text{скл}}$), взаємопов’язаністю вузлів зв’язку ПУ ($K_{\text{взп}}$), ізолюваністю ($K_{\text{із}}$) та рівномірністю інформаційного навантаження вузлів зв’язку ПУ ($K_{\text{рн}}$) [17, 18].

У загальному вигляді показник якості структури інформаційної мережі СУ угруповання РТВ розраховується як середньозважений за наступним виразом:

$$P_{\text{сім}} = \frac{2 - K_{\text{скл}} + K_{\text{взп}} + K_{\text{із}} - K_{\text{рн}}}{4}. \quad (8)$$

Складність структури інформаційної мережі СУ ($K_{\text{скл}}$) визначається кількісним показником,

який приймає значення 0, коли найпростіша мережа складається з двох вузлів зв’язку ПУ і зростає до 1, при збільшенні кількості вузлів зв’язку ПУ у мережі [17, 18]:

$$K_{\text{скл}} = \left(1 - \exp\left(\frac{2}{N_{\text{вз}}} - 1\right) \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right); \quad (9)$$

Враховуючи те, що $\left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right) \cong 1,587$, то вираз

(9) можна представити у наступному вигляді:

$$K_{\text{скл}} = 1,587 \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{2}{N_{\text{вз}}} - 1\right) \right); \quad (10)$$

$$N_{\text{вз}} = N_{\text{вз(вх)}} + N_{\text{вз(вих)}}, \quad (11)$$

де $N_{\text{вз}}$ – кількість вузлів зв’язку ПУ, які забезпечують прийом і передачу інформації в СУ;

$N_{\text{вз(вх)}}$ – кількість вузлів зв’язку ПУ, які мають вхідні напрямки зв’язку (споживачів інформації);

$N_{\text{вз(вих)}}$ – кількість вузлів зв’язку ПУ, які мають вихідні напрямки зв’язку (джерел інформації).

Взаємопов’язаність вузлів зв’язку ПУ ($K_{\text{взп}}$) – це кількісний показник, який набуває значення 1, коли всі джерела та споживачі мають двосторонній зв’язок, та 0, коли жоден з них не пов’язаний з іншим:

$$K_{\text{взп}} = \exp\left(\frac{N_{\text{із}}}{N_{\text{із}^{\text{max}}}} - 1\right) - \exp(-1) \cdot \left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right); \quad (12)$$

Враховуючи те, що $\left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right) \cong 1,587$, а

$\exp(-1) \cong 0,368$, то вираз (12) можна представити у наступному вигляді:

$$K_{\text{взп}} = \exp\left(\frac{N_{\text{із}}}{N_{\text{із}^{\text{max}}}} - 1\right) - 0,584; \quad (13)$$

$$N_{\text{із}^{\text{max}}} = N_{\text{вз(інш)}} \cdot (N_{\text{вз(інш)}} - 1); \quad (14)$$

де $N_{\text{із}}$ – загальна кількість напрямків зв’язку, яка розгорнута в мережі СУ;

$N_{\text{вз(інш)}}$ – кількість вузлів зв’язку ПУ, які мають зв’язок з іншими ПУ;

$N_{\text{із}^{\text{max}}}$ – максимально можлива кількість

напрямок зв'язку, коли між всіма ($N_{ВЗ(інт)}$) вузлами зв'язку ПУ реалізований двосторонній зв'язок.

Рівномірність навантаження вузлів зв'язку ПУ ($K_{рн}$) кількісно визначається показником, що приймає значення 1, коли всі вузли зв'язку ПУ на вході і виході інформаційної мережі завантажені приблизно однаково, та зменшується до 0, коли рівномірність навантаження порушується:

$$K_{рн} = \left(\exp \left(- \frac{2 \cdot (K_{нз(вх)} - K_{нз(вих)})}{N_{нз}} \right) - \exp(-1) \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right), \quad (15)$$

Враховуючи те, що $\left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right) \cong 1,587$, а $\exp(-1) \cong 0,368$, то вираз (15) можна представити у наступному вигляді:

$$K_{рн} = 1,587 \cdot \left(\exp \left(- \frac{2 \cdot (K_{нз(вх)} - K_{нз(вих)})}{N_{нз}} \right) - 0,368 \right), \quad (16)$$

де $N_{нз(вх)}$ – кількість вхідних напрямків зв'язку (споживачів інформації);

$N_{нз(вих)}$ – кількість вихідних напрямків зв'язку (джерел інформації);

$N_{нз}$ – загальна кількість напрямків зв'язку, яка розгорнута в мережі СУ;

Ізольованість вузлів зв'язку ПУ ($K_{із}$) – це кількісний показник, що приймає значення 0, якщо немає ізольованих (тобто непов'язаних з іншими) вузлів зв'язку ПУ, та зростає до 1 при збільшенні їх кількості у мережі зв'язку СУ:

$$K_{із} = \left(1 - \exp \left(- \frac{N_{ВЗ(із)}}{N_{ВЗ}} \right) \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right) \quad (17)$$

Враховуючи те, що $\left(\frac{1}{1 - \exp(-1)} \right) \cong 1,587$, то вираз (17) можна представити у наступному вигляді:

$$K_{із} = 1,587 \cdot \left(1 - \exp \left(- \frac{N_{ВЗ(із)}}{N_{ВЗ}} \right) \right), \quad (18)$$

де $N_{ВЗ(із)}$ – кількість ізольованих вузлів зв'язку ПУ в мережі СУ;

$N_{ВЗ}$ – загальна кількість вузлів зв'язку ПУ в

мережі СУ.

Обговорення

У статті, для оцінювання ефективності функціонування СУ угруповання РТВ, запропоновано сукупність показників оцінювання ефективності її функціонування, основними з яких є [17, 18]: показник обґрунтованості управління; показник оперативності управління; показник відповідності ОШС ОУ, ПУ, ПЗв і АУ СУ завданням, які покладаються на угруповання РТВ; показник якості структури інформаційної мережі СУ.

Висновки

Використання запропонованих показників ефективності функціонування СУ угруповання РТВ дозволить: кількісно і якісно оцінити її стан та готовність до виконання поставлених завдань; оперативно проводити корекцію планів та обґрунтовано приймати рішення щодо управління підпорядкованими силами і засобами; якісно здійснювати заходи з управління військами, що безумовно позитивно вплине на реалізацію їх бойових можливостей під час бойового застосування.

Матеріали статті можуть бути корисними для фахівців оперативної і тактичної ланок управління, які займаються питаннями удосконалення функціонування систем управління родів військ Повітряних Сил з метою підтримання їх постійної готовності до здійснення управління.

У подальшому, за обраним напрямком дослідження, доцільно визначитися з показниками стійкості СУ угруповання РТВ (живучості, завадостійкості, технічної надійності засобів зв'язку і автоматизації) і з урахуванням запропонованої сукупності показників, оцінити її якість під час бойового застосування.

Список використаних джерел

1. Тактика радіотехнічних військ : навчальний посібник / Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, В. І. Боровий та ін. ; за заг. ред. Г. В. Худова. Харків. : ХНУПС, 2018. 240 с.
2. Рішення – основа управління військами (силами) : навчальний посібник / [В. С. Безбах, О. Я. Зубов, О. Р. Факадей та ін.]. Київ : НУОУ, 2024. 184 с.
3. Шуєнкін В. О. До питання оцінювання ефективності системи управління військами (силами). Наука і оборона. Київ : НУОУ, 2010. № 4. С. 23–28.
4. Гусак Ю. А., Кірсанов С. О., Власюк В. М. Аналіз існуючого методичного апарату з обґрунтування вимог до сучасної автоматизованої системи управління військами. Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України. Київ : ЦНДІ ЗСУ, 2020. № 4(95). С. 14–24.
5. Ткаченко В. І., Смирнов Є. Б., Нерубацький В. Є. Підхід до формування показників ефективності систем управління військами, виходячи з основного закону збройної боротьби. Наука і техніка Повітряних сил Збройних Сил України, 2013, № 3(12). С. 18–21.
6. Наконечний О. В. Методика оцінювання ефективності функціонування системи логістичного забезпечення сил оборони держави. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків : ХНУПС, 2020. №1(38). С. 54–60.

<https://doi.org/10.30748/nitps.2020.38.06>.

7. Залож В., Глуздань О., Глуздань В. Науково-методичний апарат оцінювання ефективності системи управління державної прикордонної служби України. Збірник наукових праць Національної академії державної прикордонної служби України. Хмельницький : НА ДПСУ, 2019. №2(80). С. 84–103.

<https://doi.org/10.32453/3.v80i2.192>.

8. Баранов Ю., Баранов А., Кузьмичев А. Вибір та обґрунтування показників оцінки ефективності функціонування системи логістичного забезпечення. Збірник наук. праць Національної академії державної прикордонної служби України. Хмельницький : НА ДПСУ, 2019. №3(81). С. 291–301.

<https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military.tech/article/view/477>.

9. Талавира В. О., Книш Д. В., Бутенко А. В., Орехов С. В. Теоретичні основи урахування безперервності управління силами та засобами військ протиповітряної оборони Сухопутних військ при визначенні оцінки ефективності системи управління. Системи озброєння і військова техніка. 2006. № 4(8). С. 42–46.

10. Кучеренко Ю. Ф., Носик А. М., Ткачов А. М., Шубін С. В. Визначення ефективності функціонування системи управління військового призначення з врахуванням вагомості, своєчасності та якості виконання завдань у її підсистемах. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2019. № 4(62). С. 53–60.

<https://doi.org/10.30748/zhups.2019.62.07>.

11. Лисий М., Удод В. Аналіз впливу визначених чинників на управління силами і засобами логістичного забезпечення та визначення недоліків цього процесу. Збірник наукових праць Національної академії державної прикордонної служби України. Хмельницький : НА ДПСУ. 2022. № 1, 2 (87). С. 85–99. <https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military.tech/article/view/1084>.

[le/view/1084](https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.01).

12. Волков А. Ф., Лезік О. В., Долина М. П., Корсунов С. І., Федченко С. І., Гуленов І. В. Аналіз, оцінка та шляхи підвищення ефективності системи управління підрозділами ППО Сухопутних військ за рахунок безперервності її функціонування. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків : ХНУПС, 2021. № 3(69). С. 7–15. DOI : 10.30748/zhups.2021.69.01.

13. Лобанов А. А., Мозговий Р. А. До оцінювання ефективності управління військами (силами). Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. НУОУ, 2019. № 3(36). С. 5–10.

<https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-5-10>.

14. Барабаш Ю. Л. Основи теорії оцінювання ефективності складних систем (Методологія військових досліджень) : навчальний посібник. Київ : НАОУ, 1999. 39 с.

15. Загорка О. М., Мосов С. П., Сбітнев А. І., Стужук П. І. Елементи дослідження складних систем військового призначення. Навчальний посібник. Київ : НАОУ, 2005. 100 с.

16. Городнов В. П., Дробаха Г. А., Єрмошин М. О., Смірнов Є. Б., Ткаченко В. І. Моделювання бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони та інформаційне забезпечення процесів управління ними (теорія, практика, історія розвитку). Монографія. Харків : ХВУ, 2004. 340 с.

17. Горопчин А.Я., Кириченко І.О., Єрмошин М.О., Дробаха Г.А., Долина М. П. Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка її ефективності : монографія. Харків : ХУПС, 2006. 310 с.

18. Єрмошин М.О. Основні показники для оцінки ефективності функціонування системи протиповітряної оборони. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. Харків : ХНУПС, 2008р. № 2 (17). С. 14–16.

Serhii Popov (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-7410-1267>

Oleksandr Pukhovyi (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

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

Yevhen Yufa (Candidate of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-6362-5986>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

DEFINITION OF THE SET OF INDICATORS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE FUNCTIONING OF THE MANAGEMENT SYSTEM OF THE GROUP OF RADIOTECHNICAL TROOPS

In the article defines a set of indicators for evaluating the effectiveness of the management system of a group of radio technical troops during combat use. The use of these indicators will allow: to assess the state of the management system of the radiotechnical troops and its readiness to perform the assigned tasks quantitatively and qualitatively; promptly correct plans and make reasonable decisions regarding the management of subordinate forces and means; qualitatively carry out military management measures, which will definitely have a positive effect on the realization of their combat capabilities. The research was conducted using well-known scientific methods, in particular, analysis and probability theory, which made it possible to describe the main processes circulating in the management system of the group of radiotechnical troops. The materials of the article can be useful for specialists of operational and tactical management who deal with issues of improving the functioning of the management systems of Air Force branches in order to maintain their constant readiness for management.

Keywords: radiotechnical troops, management system, efficiency indicator, justification, efficiency, compliance, quality.

References

1. I. Taktika radiotekhnichnykh viys'k : navchal'nyy posibnyk / H. V. Khudov, B. V. Bakumenko, V. I. Borovyv ta in. ; za zah. red. H. V. Khudova. Kharkiv. : KHNUPS, 2018. 240 s.
2. Rishennya – osnova upravlinnya viys'kamy (sylamy) : navchal'nyy posibnyk / [B. C. Bezbakh, O. YA. Zybov, O. P. Fakadey ta in.]. Kyiv : NUOU, 2024. 184 s.
3. Shuyenkin V. O. Do pytannya otsynuyvannya efektyvnosti systemy upravlinnya viys'kamy (sylamy). Nauka i oborona. Kyiv : NUOU, 2010. № 4. S. 23–28.
4. Husak YU. A., Kirsanov S. O., Vlasyuk V. M. Analiz isnyuchoho metodychnoho aparatu z obgruntuvannya vymoh do suchasnoyi avtomatyzovanoi systemy upravlinnya viys'kamy. Zbirnyk naukovykh prats' Tsentral'noho nauko-doslidnoho instytutu Zbroynykh Syl Ukrainy. Kyiv : TSNDI ZSU, 2020. № 4(95). S. 14–24.
5. Tkachenko V. I., Smyrnov YE. B., Nerubats'kyy V. YE. Pidkhid do formuvannya pokaznykiv efektyvnosti system upravlinnya viys'kamy, vykhodyachy z osnovnoho zakonu zbroynoyi borot'by. Nauka i tekhnika Povitryanykh syl Zbroynykh Syl Ukrainy, 2013, № 3(12). S. 18–21.
6. Nakonechnyy O. V. Metodyka otsynuyvannya efektyvnosti funktsionuvannya systemy lohistychnoho zabezpechennya syl oborony derzhavy. Nauka i tekhnika Povitryanykh Syl Zbroynykh Syl Ukrainy. Kharkiv : KHNUPS, 2020. №1(38). S. 54–60.
<https://doi.org/10.30748/nitps.2020.38.06>.
7. Zalozh V., Hluzdan' O., Hluzdan' V. Nauko-metodychnyy aparat otsynuyvannya efektyvnosti systemy upravlinnya derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrainy. Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrainy. Khmel'nyts'kyy : NA DPSU, 2019. №2(80). S. 84–103.
<https://doi.org/10.32453/3.v80i2.192>.
8. Baranov YU., Baranov A., Kuz'mychev A. Vybir ta obgruntuvannya pokaznykiv otsinky efektyvnosti funktsionuvannya systemy lohistychnoho zabezpechennya. Zbirnyk nauk. prats' Natsional'noyi akademiyi derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrainy. Khmel'nyts'kyy : NA DPSU, 2019. №3(81). S. 291–301.
<https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military.tech/article/view/477>.
9. Talavyrya V. O., Knysh D. V., Butenko A. V., Orekhov S. V. Teoretychni osnovy urakhuvannya bezperernosti upravlinnya sylamy ta zasobamy viys'k protypovitryanoyi oborony Sukhoputnykh viys'k pry vyznachenni otsinky efektyvnosti systemy upravlinnya. Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika. 2006. № 4(8). S. 42–46.
10. Kucherenko YU. F., Nosyk A. M., Tkachov A. M., Shubin YE. V. Vyznachennya efektyvnosti funktsionuvannya systemy upravlinnya viys'kovoho pryznachennya z vrakhuvanniam vahomosti, svoechasnosti ta yakosti vykonannya zavdan' u yiyi pidsystemakh. Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho natsional'noho universytetu Povitryanykh Syl. 2019. № 4(62). S. 53–60.
<https://doi.org/10.30748/zhups.2019.62.07>.
11. Lysyy M., Udod V. Analiz vplyvu vyznachenykh chynnykiv na upravlinnya sylamy i zasobamy lohistychnoho zabezpechennya ta vyznachennya nedolikhiv ts'oho protsesu. Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrainy. Khmel'nyts'kyy : NA DPSU. 2022. № 1, 2 (87). S. 85–99.
<https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military.tech/article/view/1084>.
12. Volkov A. F., Lezik O. V., Dolyna M. P., Korsunov S. I., Fedchenko S. I., Hulenov I. V. Analiz, otsinka ta shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti systemy upravlinnya pidrozdilamy PPO Sukhoputnykh viys'k za rakhunok bezperernosti yiyi funktsionuvannya. Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho natsional'noho universytetu Povitryanykh Syl. Kharkiv : KHNUPS, 2021. № 3(69). S. 7–15. DOI : 10.30748/zhups.2021.69.01.
13. Lobanov A. A., Moz'hovyy R. A. Do otsynuyvannya efektyvnosti upravlinnya viys'kamy (sylamy). Suchasni informatsiyne tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony. NUOU, 2019. № 3(36). S. 5–10.
<https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-5-10>.
14. Barabash YU. L. Osnovy teoriiy otsynuyvannya efektyvnosti skladnykh system (Metodolohiya viys'kovykh doslidzhen') : navchal'nyy posibnyk. Kyiv : NAOU, 1999. 39 s.
15. Zahorka O. M., Mosov S. P., Sbitnyev A. I., Stuzhuk P. I. Elementy doslidzhennya skladnykh system viys'kovoho pryznachennya. Navchal'nyy posibnyk. Kyiv : NAOU, 2005. 100 s.
16. Horodnov V. P., Drobakha H. A., Yermoshyn M. O., Smirnov YE. B., Tkachenko V. I. Modelyuvannya boyovykh diy viys'k (syl) protypovitryanoyi oborony ta informatsiyne zabezpechennya protsesiv upravlinnya nymy (teoriya, praktyka, istoriya rozvytku). Monohrafiya. Kharkiv : KHVU, 2004. 340 s.
17. Toropchyn A.YA., Kyrychenko I.O., Yermoshyn M.O., Drobakha H.A., Dolyna M. P. Syntez adaptivnykh struktur systemy zenitnoho raketno-artyleryys'koho prykryttya ob'yektiv i viys'k ta otsinka yiyi efektyvnosti : monohrafiya. Kharkiv : KHUPS, 2006. 310 s.
18. Yermoshyn M.O. Osnovni pokaznyky dlya otsinky efektyvnosti funktsionuvannya systemy protypovitryanoyi oborony. Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho natsional'noho universytetu Povitryanykh Syl. Kharkiv : KHNUPS, 2008r. № 2 (17). S. 14–16.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-18-23

УДК 629.735.45.023:534.242

Онищенко Володимир Михайлович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-6547-6646>

Спіркін Євген Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0003-2924-0545>

Яшенюк Володимир Жоржевич (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-7806-8078>

Отрешко Наталія Миколаївна

<https://orcid.org/0000-0003-0677-3090>

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ПРУЖНОГО БПЛА НА ПОСАДЦІ

Проектування безпілотних літальних апаратів здійснюється на невелике значення максимального експлуатаційного перевантаження. Їх конструкція достатньо гнучка і характеризується складним розподілом жорсткостей силових елементів та наявністю великої кількості зосереджених мас. В процесі експлуатації безпілотних літальних апаратів літакового типу на ґрунтових аеродромах, при русі, злеті і посадці виникають значні деформації та коливання планера, які суттєво навантажують конструкцію, впливають на міцність, призводять до витрати ресурсу планера та впливають на роботу обладнання. Для безпілотних літальних апаратів актуальними є питання аеропружності та динамічного навантаження конструкції в процесі експлуатації. В статті показано застосування математичного моделювання на прикладі розрахунку динаміки удару і навантаження пружного безпілотного літального апарату на посадці. Метою статті є аналіз впливу пружності конструкції планера та її динамічних характеристик (форм та частот власних коливань) і параметрів амортизації на динаміку руху механічної системи та навантаження безпілотних літальних апаратів. Надано рекомендації для застосування розрахункового методу, сформовані математичні моделі функціонування пружного безпілотного літального апарату різного рівня складності. Ці рекомендації будуть корисні для конструкторів та операторів безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: математичне моделювання, аеропружність, динамічні характеристики, форми та частоти власних коливань, динамічне навантаження, пружний БПЛА, амортизація шасі.

Вступ

Посадка безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є одним із складних і небезпечних етапів польоту. Нерідко посадка виконується при складних метеоумовах, на непристосованих майданчиках, при відмовах і несправностях авіаційної техніки (відмові двигунів, системи керування літаком), при помилках оператора.

Під час грубої посадки за частки секунди сили при ударі сягають значних величин, в елементах планера і шасі від цих сил виникають значні прискорення, в конструкції збуджуються інтенсивні механічні коливання [1]. Ці динамічні навантаження здійснюють негативний вплив не тільки на елементи конструкції БПЛА, а і на обладнання, що знаходиться як на бору, так і те, що може підвішуватись на зовнішні вузли підвіски. Визначення динамічної реакції БПЛА і навантаження пружної конструкції при посадці відноситься до актуальної задачі динамічної аеропружності [2, 3]. Динамічні навантаження в деяких випадках настільки важкі для конструкції, що призводять до руйнувань і відмови обладнання.

В процесі експлуатації БПЛА слід розуміти

фізичні основи функціонування і навантаження конструкції БПЛА, знати основні чинники, що впливають на міцність конструкції. Внаслідок складності визначення динамічних навантажень теоретичним шляхом на практиці все частіше звертаються до математичного моделювання посадки на ЕОМ. Математичні моделі (ММ) динаміки удару і навантаження БПЛА при посадці дозволяють детально дослідити в реальному масштабі часу збурений рух БПЛА, проаналізувати перехідний процес динамічної реакції конструкції, провести широкі параметричні дослідження й запропонувати дієві заходи щодо зменшення рівня вібрації та змінних напружень у конструкції [4]. Ефективними конструктивними заходами є зміна масово-інерційних й жорсткісних характеристик конструкції та параметрів амортизації шасі.

Мета статті – проаналізувати вплив пружності конструкції планера та її динамічних характеристик (форм та частот власних коливань) і параметрів амортизації на динаміку руху механічної системи та навантаження БПЛА.

Матеріали та методи

Постановка завдання дослідження полягає в

тому щоб дослідити роботу амортизації шасі пружного БпЛА шляхом аналізу конструкції планера та його динамічних характеристик. На основі математичного моделювання на прикладі розрахунку динаміки удару і навантаження пружного безпілотного літального апарату на посадці згенерувати пропозиції оператору БпЛА.

На даний час при оцінюванні пружності конструкції планера та її динамічних характеристик застосовуються методики, які використовуються для оцінювання динамічних навантажень як окремих елементів конструкції так і конструкції в цілому при різних (критичних) варіантах навантаження [5–8]. У [5, 6] запропонована методика оцінювання величин навантаження що діють на повітряне судно в типовому польоті. У статті [8] запропоновано методику, яка дозволяє моделювати та проводити розрахунки навантажень під час ударів пружного повітряного судна на посадці. Розглянутий підхід не дозволяє достатньо повно розрахувати системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку руху БпЛА, пружних коливань конструкції та деформування нелінійного шасі під час грубої посадки.

Результати

Створення розрахункової моделі аероупругості БпЛА для дослідження динамічних процесів при посадці передбачає синтез даних нестационарної аеродинаміки, теорії пружності і механічних коливань, а також рівнянь динаміки польоту і нелінійних співвідношень для деформування амортизації шасі.

Реакція поверхні аеродрому при посадці в основному визначає динаміку руху літального апарату (ЛА). Величина аеродинамічного навантаження при посадці значно менша у порівнянні з навантаженням у польоті. Просторовий рух БпЛА уявляється як рух центру мас БпЛА, його обертання навколо центру мас і пружних деформацій конструкції та деформування шасі. Переміщення і кути повороту БпЛА як твердого тіла вважаємо кінцевими, а пружні переміщення вважаємо досить малими. Інерційна система координат фіксована щодо Землі.

Важливим є адекватне моделювання взаємодії планера і шасі в процесі удару ЛА. Для цього проводиться декомпозиція системи і розглядаються сумісні диференціальні рівняння пружних коливань планера і динаміки стійок шасі.

Рівняння руху центру мас БпЛА і обертання навколо нього в процесі посадки ЛА мають вигляд:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{R}_a + \vec{R}_u + \vec{P} + \vec{G}, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{K}}{dt} = \vec{M}, \quad (2)$$

де $\vec{R}_a, \vec{R}_u, \vec{P}, \vec{G}$ – головні вектори аеродинамічних сил, реакції поверхні аеродрому,

тяги двигунів та сили тяжіння;

\vec{K} – головний момент кількості руху “твердого” БпЛА;

\vec{M} – головний момент відносно центру мас зовнішніх сил.

Нестационарні аеродинамічні характеристики збуреного руху ЛА при посадці визначимо на основі гіпотези квазістационарності. Розрахунок обтікання ЛА будемо проводити у лінійній постановці. Вважаємо, що кути атаки та ковзання всього ЛА та місцеві кути атаки на поверхні, що викликані збуреним рухом і деформацією БпЛА, є малими.

Як розрахункову схему конструкції виберемо лінійну пружну модель. Скористаємося найбільш поширеною балковою схематизацією конструкції. Основні агрегати ЛА (крило, фюзеляж, оперення) замінюються еквівалентними балками, що мають розподілені по довжині маси і жорсткості. Стиги балок можуть бути як абсолютно жорсткими, так і пружними, що характеризуються матрицями піддатливості. Балки мають розподілені інерційні властивості – погонні маси і моменти інерції. За осьову лінію балки вибираємо геометричні місця центрів жорсткості поперечних перерізів. Задаємо жорсткість на кручення GI_ρ і на згинання EI (у вертикальній площині).

Будь-який переріз балки переміщується як жорстке ціле, тому достатньо в перерізі z задати його вертикальне переміщення $y(z, t)$ і кут повороту $\vartheta(z, t)$. Переміщення осі жорсткості обумовлене деформаціями згинання і кручення балки. Згідно з методом заданих форм переміщення перерізу несучої поверхні описують у вигляді добутку форм на узагальнені координати $q(t)$, що залежать тільки від часу:

$$y(z, t) = \sum_{i=1}^N f_i(z) q_i(t), \quad (3)$$

$$\vartheta(z, t) = \sum_{j=1}^N \varphi_j(z) q_j(t), \quad (4)$$

де N – число тонів власних коливань, що утримуються.

Пружні коливання конструкції визначаються з системи N диференціальних рівнянь

$$\ddot{q} + 2\chi_k \omega_k \dot{q}_k + \omega_k^2 q_k = \frac{Q_k}{M_k}, \quad (5)$$

де M_k – узагальнена маса для k -ї координати ($k=1, 2, \dots, N$);

Q_k – узагальнена сила для k -ї координати;

ω_k – власна частота k -го тону;

χ_k – коефіцієнт конструкційного демпфірування.

На рис. 1 зображена дія поверхневих і зосереджених сил. Узагальнена робота для k -ї координати вздовж балок довжиною l_b від реакцій j -го амортизатора (сили P_{yj} і моменту M_{zj}), а також

погонних поверхневих (аеродинамічних) сил $q_{n\text{ пов}}(z)$ і моментів $m_{n\text{ пов}}(z)$ складає:

$$Q_K = \int_0^{l_0} f_K(z) q_{n\text{ пов}}(z) dz + \sum_j^0 P_{y_j} f_{\text{кш}_j}(z_{j\text{ш}}) +$$

$$+ \int_0^{l_0} \varphi_K(z) m_{n\text{ пов}}(z) dz + \sum_j^0 M_{y_j} \varphi_K(z_{j\text{ш}}) \quad (6)$$

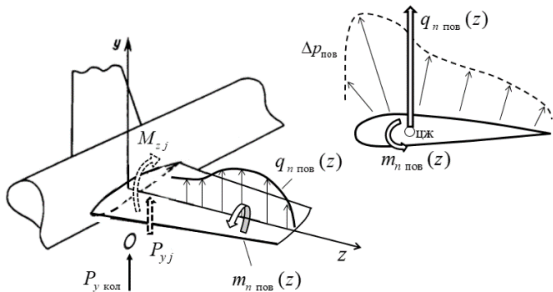


Рисунок 1. Дія поверхневих і зосереджених сил

Аеродинамічним навантаженням часто можна нехтувати, оскільки посадкові швидкості малі. Сили P_{y_j} і моменти M_{z_j} від амортизаторів шасі розраховуються з урахуванням кінематичних параметрів руху БПЛА і передаються на планер в точках кріплення стійок шасі.

Наведемо результати розрахунку на ЕОМ рівнянь аеропружності удару БПЛА на основні стійки шасі. Прийнято, що посадка здійснюється на основні стійки шасі, удар симетричний, літак збалансований за моментами (перевалювання ЛА на переднє колесо не розглядається).

Вихідні дані для БПЛА. Порівнюються дві злітні маси БПЛА: перший варіант – 445 кг (на крилі відсутнє озброєння); другий варіант – 548 кг (на крилі розміщене озброєння). Вертикальна швидкість приземлення БПЛА прийнята $V_y=2,32$ м/с. Жорсткість пневматика $C_{\text{пн}}=6,3 \cdot 10^4$ Н/м; жорсткість ресори шасі – $C_{\text{рес}}=2,34 \cdot 10^4$ Н/м.

На рис. 2 зображена розрахункова схема пружного БПЛА з шасі ресорного типу. Приведені перші два тони власних коливань вільного БПЛА та форми коливань шасі як двомасової системи.

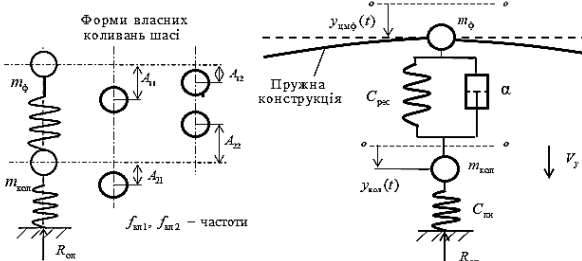


Рисунок 2. Розрахункова схема пружного БПЛА з шасі ресорного типу

Період власних коливань ЛА як одномасової системи на пружному шасі для першого варіанту складає $T_{\text{вл}1}=0,986$ с; для другого – $T_{\text{вл}2}=0,89$ с.

На рис. 3 зображені форми коливань двомасової системи «літак-колесо». Частоти коливань двох мас складають $f_{\text{вл}1}=1,018$ Гц; $f_{\text{вл}2}=8,56$ Гц. Маси при коливаннях за першою формою рухаються в один бік (пружні елементи стискаються), а за другою – в протилежних напрямках (верхня пружина стискається, а друга – розтягується). Форми коливань – ортогональні. Відзначимо великі переміщення коліс при коливаннях за другою формою. З урахуванням значення періодів власних коливань елементів шасі і часу удару ЛА слід очікувати реакцію конструкції в основному за першою формою. Другий тон коливань дає суттєву добавку на перехідних режимах – у момент удару ЛА і при відокремленні коліс від полоси.

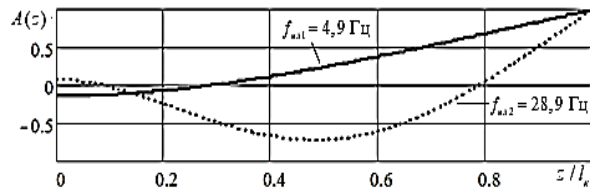


Рисунок 3. Форми коливань двомасової системи «літак-колесо»

Коефіцієнт конструкційного демпфірування для матеріалу планера прийнятий $\chi=0,03$. Коефіцієнт еквівалентного в'язкого тертя для ресори шасі становить $\alpha=2,5 \cdot 10^3$ Нс/м.

Частоти та форми власних згинальних коливань для вільного БПЛА отримані в [9] і становлять: для першого варіанту посадкової маси – $f_{\text{вл}1}=7,9$ Гц; $f_{\text{вл}2}=48,7$ Гц; $f_{\text{вл}3}=135,6$ Гц; $f_{\text{вл}4}=265,3$ Гц; для другого варіанту – $f_{\text{вл}1}=4,6$ Гц; $f_{\text{вл}2}=27,4$ Гц; $f_{\text{вл}3}=75,2$ Гц; $f_{\text{вл}4}=146,6$ Гц. Як видно, збільшення маси БПЛА при незмінних жорсткостях в системі приводить до зменшення частот вільних коливань.

На рис. 4 зображені три симетричні форми власних коливань конструкції БПЛА. В момент удару в основному збуджується перша форма коливань, оскільки час зростання реакції опори $R_{\text{оп}}$ сумірний з періодом $T_{\text{вл}1}=1/f_{\text{вл}1}=0,13$ с власних коливань БПЛА за першою формою. Треба відмітити, що при закріпленні платформи з обладнанням в вузлах коливань (точках А та В) остання буде майже нерухома в процесі динамічного навантаження.

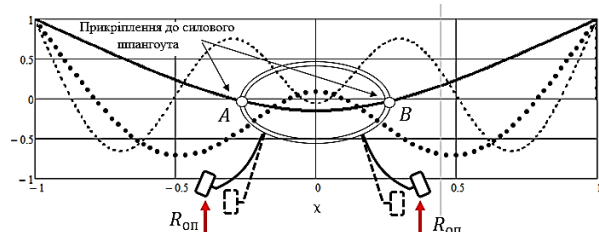


Рисунок 4. Симетричні форми власних коливань конструкції

При посадці збуджуються в основному згинальні коливання крила за першим тоном – з

частотою $f_1 = 7,95$ Гц (рис. 5). Видно, що перша узагальнена координата q_1 має також низькочастотну зміну, яка пов'язана з коливанням всього БПЛА на пружному шасі з частотою $f_0 = 0,986$ Гц. Узагальнені координати q_2, q_3 і q_4 значно менші за величиною і вносять малий вплив в деформування і навантаження БПЛА.

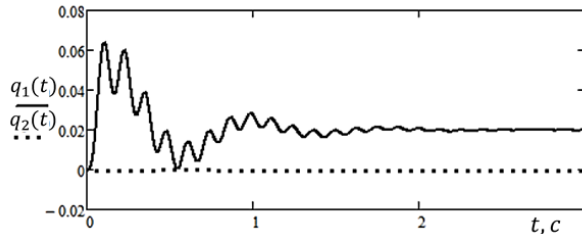
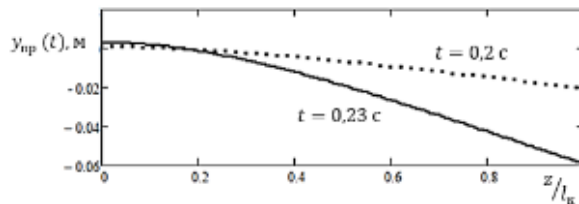
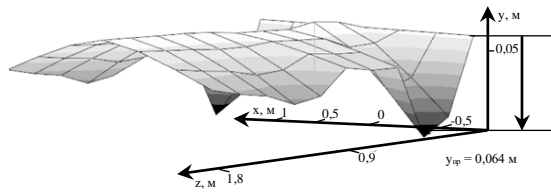


Рисунок 5. Зміна першої і другої узагальнених координат

Зміна форми крила з часом вздовж розмаху $z/l_{кр}$ показана на рис. 6 а). З рис. 6 б) видно, що максимальне відхилення кінця крила $U_{кр макс} = 0,064$ м має місце при максимальному обтисненні амортизації шасі (пневматика та ресори) в момент часу $t=0,2$ с.



а)



б)

Рисунок 6. Пружне деформування крила після удару

Пружне переміщення точки кріплення крила до силового шпангоута фюзеляжу приведені на рис. 7.

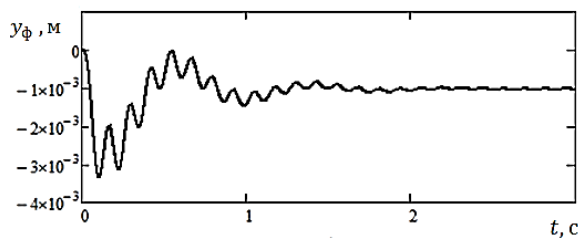


Рисунок 7. Пружне переміщення точки кріплення крила до силового шпангоута

Як видно з рис. 7 деформування та коливання крила мало впливає на роботу амортизатора та

пневматика, оскільки переміщення силового шпангоута і зв'язаного з ним циліндру амортизатора складає всього декілька міліметрів.

Прискорення різних частин БПЛА (кінця крила, колеса та силового шпангоута фюзеляжу) приведені на рис. 8. Як, видно, характер їх руху суттєво відрізняється. Максимальні прискорення на початку удару сягають (3 ... 5) g і за (1 ... 2) с зникають внаслідок дії сил тертя в конструкції.

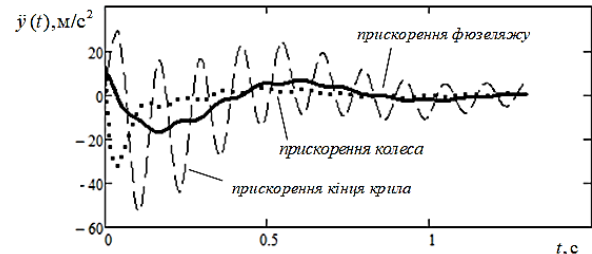


Рисунок 8. Прискорення різних частин БПЛА

Найбільш навантаженими є консолі крила – поверхні великого подовження.

Вертикальне перевантаження БПЛА сягає двох – трьох одиниць (рис. 9). Крива 2 показує перевантаження, яке розраховано без урахування пружності конструкції, а крива 1 – з урахуванням.

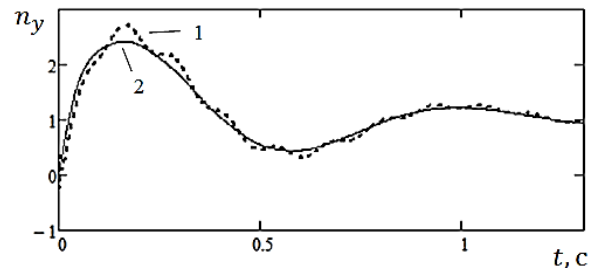


Рисунок 9. Вертикальне перевантаження БПЛА

Зміна першої узагальненої координати для двох схем розподілу мас на крилі приведена на рис. 10. Крива 1 – на крилі відсутнє озброєння; крива 2 – озброєння є. Динамічна реакція (переміщення, зусилля) навантаженого БПЛА збільшилася майже в три рази.

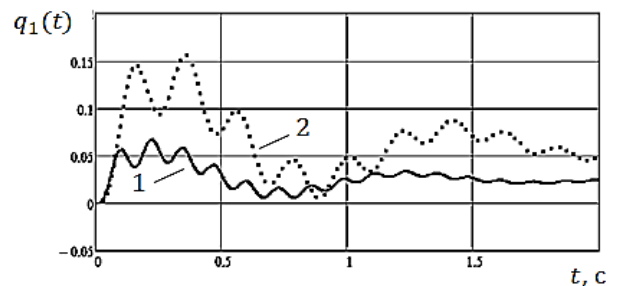


Рисунок 10. Зміна першої узагальненої координати для двох схем розміщення мас на крилі БПЛА

Діаграма роботи амортизації шасі для двох схем розміщення мас на крилі представлена на рис. 11

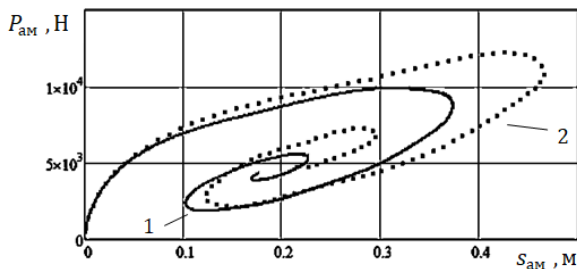


Рисунок 11. Діаграма роботи амортизації шасі для двох схем розміщення мас на крилі

Сили, що діють на шасі, при більшій масі БпЛА суттєво зростають.

Обговорення

Аналіз роботи механічної системи проведений на основі рішення системи рівнянь, що описують динаміку руху БпЛА, пружних коливань конструкції та деформування нелінійного шасі. Деформація конструкції розкладається за власними функціями, що відображають пружні властивості конструкції в інтегральному сенсі [10]. Пружні коливання і деформацію БпЛА розраховано на основі методу заданих форм. Деформацію БпЛА розкладено за симетричними та косиметричними формами вільних коливань конструкції. Враховується конструкційне демпфірування при коливаннях планера. Конструкція шасі уявляється як система мас і складається з пружних балок, жорстких важелів, шарнірів, амортизаторів та коліс. Розглядається модель ресорного амортизатора. Враховується демпфірування в шасі (ресорі) шляхом введення еквівалентного в'язкого тертя.

Висновки

Аналіз впливу пружності конструкції планера та її динамічних характеристик і параметрів амортизації на динаміку руху механічної системи та навантаження БпЛА показав, що в процесі експлуатації БпЛА на ґрунтових аеродромах, при русі, злеті і посадці і складних метеоумовах, при відмовах авіаційної техніки, при помилках оператора виникають значні динамічні навантаження конструкції, які суттєво впливають

на міцність БпЛА та впливають на роботу обладнання. Використання ММ задач аеропружності та розрахунок на ЕОМ процесу функціонування БпЛА дозволяє оперативно і в короткі терміни отримати важливу для експлуатації та прийняття відповідних рішень інформацію.

Список використаних джерел

1. Бойко А.П., Мамлюк О.В., Терещенко Ю.М. "Конструкція літальних апаратів", К.: Вища освіта, 2001. – 383 с
2. Снисаренко Т.В., Чубань В.Д. Математическое моделирование динамических нагрузок при взлете и посадке упругого самолета [Текст] / Т.В. Снисаренко, В.Д. Чубань. // Ученые записки ЦАГИ, том XXXIX, №3 – М.: 2008. – 14 с.
3. Spieck M.: Ground dynamics of flexible aircraft in consideration of aerodynamic effects. Hochschulschrift Technische University München, Germany, 2004.
4. Публікація співавтора статті.
5. Бойко Т. С. Методика теоретической оценки интегральной повторяемости перегрузок, действующих на самолет в типовом полете / Т. С. Бойко // Авиационно-космическая техника и технология. - 2019. - № 3. - С. 35-41.
6. Ali, D. Development of fatigue loading spectra from flight test data [Electronic resource] / Dilawar Ali, Amer Shahzad, Tanveer A Khan // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3296 – 3304. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616304309>. – 15.05.2019. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.411.
7. ОСТ 1 02514–84. Модель турбулентности атмосферы [Текст]. – Введ. 01.01.1986. – 13 с.
8. Онищенко В.М. Математичне моделювання удару пружного літального апарата на посадці: сб. Открытые информационные и компьютерные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун -та им. Н. Е. Жуковского "Харьков. авиац. ин-т". – Вып. 84. – Харьков, 2019. – С. 165...169.
9. Онищенко В.М. Вільні та вимушені коливання конструкції літального апарата з декількома степенями вільності [Текст] : навч. посіб. / В. М. Онищенко. – Харків: ХАИ, 2019. – 184 с.
10. Будівельна механіка авіаційних конструкцій. Частина 2. Розрахунок тонкостінних стрижнів. навч. посібник / О.Г.Дібір. – Харків: Нац. аеросм. ун-т ім. Н.Є. Жуковського "Харків. авиац. ін-т", 2019. – 280 с.

Volodymyr Onishchenko (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-6547-6646>

Yevhen Spirkin (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0003-2924-0545>

Volodymyr Yashchenok (Candidate of Technical Sciences Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-7806-8078>

Natalya Otreshko

<https://orcid.org/0000-0003-0677-3090>

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF THE LOAD FLEXIBLE UAV ON LANDING

The design of unmanned aerial vehicles (UAVs) is carried out for a small value of the maximum operational overload. Their design is sufficiently flexible and is characterized by a complex distribution of stiffnesses of power elements and the presence of a large number of concentrated masses. During the operation of the aircraft on the ground airfields, during movement, take-off and landing, significant deformations and vibrations of the airframe occur, which significantly load the structure, affect the strength, lead to the consumption of the airframe resource and affect the operation of the equipment. For UAVs, issues of aeroelasticity and dynamic load of the structure during operation are relevant. The article shows the application of mathematical modeling on the example of calculating the impact dynamics and loading of an elastic UAV during landing. The goal was to analyze the influence of the elasticity of the airframe structure and its dynamic characteristics (shapes and frequencies of natural oscillations) and damping parameters on the dynamics of the movement of the mechanical system and the load of the UAV. Recommendations for the application of the calculation method are given, and mathematical models of the functioning of elastic UAVs of various levels of complexity are formed. These guidelines will be useful for designers and operators of unmanned aerial vehicles.

Keywords: mathematical modeling, aeroelasticity, dynamic characteristics, forms and frequencies of self-oscillations, dynamic load, elastic UAV, chassis damping.

References

1. Boyko A.P., Mamiyuk O.V., Tereschenko Yu.M. "Konstruktsiya litalnih aparativ", K.: Vischa osvita, 2001. – 383 p.
2. Snisarenko T.V., Chuban V.D. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskikh nagruzok pri vzlete i posadke uprugogo samoleta [Tekst] / T.V. Snisarenko, V.D. Chuban. // Uchenyie zapiski TSAGI, tom XXXIX, №3 – M. : 2008. – 14 s.
3. Spieck M.: Ground dynamics of flexible aircraft in consideration of aerodynamic effects. Hochschulschrift Technische University München, Germany, 2004.
4. Article co-author publication.
5. Boyko T. S. Metodika teoreticheskoy otsenki integralnoy povtoryaemosti peregruzok, deystvuyuschih na samolet v tipovom polete / T. S. Boyko // Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. - 2019. - № 3. - S. 35-41.
6. Ali, D. Development of fatigue loading spectra from flight test data [Electronic resource] / Dilawar Ali, Amer Shahzad, Tanveer A Khan // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 3296 – 3304. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616304309>. – 15.05.2019. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.411.
7. OST 1 02514–84. Model turbulentsnosti atmosfery [Tekst]. – Vved. 01.01.1986. – 13 p.
8. Onishchenko V.M. Matematichne modelyuvannya udaru pruzhnogo litalnogo aparata na posadki: sb. Otkrytyie informatsionnyie i kompyuternyye tehnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un -ta im. N. E. Zhukovskogo "Harkov. aviats. in-t". – Vyip. 84. – Harkov, 2019. – P. 165-169.
9. Onishchenko V.M. Vilni ta vimusheni kolivannya konstruktsiyi litalnogo aparata z dekilkom stepenyami vilnosti [Tekst] : navch. posib. / V. M. Onishchenko. – Harkiv: HAI, 2019. – 184 p.
10. Budivselna mehanika aviatsiy nih konstruktsiy. Chastina 2. Rozrahunok tonkostinnih strizhniv. navch. posibnik / O.G.Dibir. – Harkiv: Nats. aerokosm. un-t Im. N.E. Zhukovskogo "Harkiv. aviats. In-t", 2019. – 280 p.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-24-30

УДК 355.358

Луцевят Олександр Іванович

<https://orcid.org/0009-0001-2435-5434>

Волошин Ігор Іванович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0003-9315-5246>

Ярошенко Ярослав Віталійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

Роговець Олександр Васильович

<https://orcid.org/0009-0000-0880-2102>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ СИТУАЦІЙНОЇ ОБІЗНАНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ВІД БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ В ОПЕРАЦІЇ УГРУПОВАННЯ ОБ'ЄДНАНИХ СИЛ

Особливості повномасштабної збройної агресії з боку російської федерації, обмеженість ресурсів, зміна існуючих форм і способів застосування угруповань військ під впливом сучасного озброєння та військової техніки та широкого застосування безпілотних (безекіпажних) апаратів визначає необхідність розробки автоматизованих системи управління військами та зброєю, раціонального планування та ефективного використання наявних ресурсів, пошуку нових методів підвищення ефективності сил та засобів в сучасних умовах ведення розвідки та вогневого ураження противника.

З огляду на актуальність порушеного питання у статті, в загальному вигляді, розглянуто поняття ситуаційної обізнаності, особливості систем ситуаційної обізнаності, їх місце в автоматизованих системах управління військами (озброєнням), перелічено та проведено аналіз факторів, що впливають на ефективність системи ситуаційної обізнаності з урахуванням інформації від безпілотних авіаційних комплексів.

Метою статті є виділити, розглянути та визначити числові значення факторам, що можуть найбільше впливати на ефективність системи ситуаційної обізнаності з урахуванням інформації від безпілотних авіаційних комплексів в операції угруповання об'єднаних сил. Стаття буде корисною для наукових та науково-педагогічних працівників, які проводять дослідження у сфері управління військами та систем підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: ситуаційна обізнаність, системи ситуаційної обізнаності, фактори, ефективність, безпілотні авіаційні комплекси, безпілотні літальні апарати.

Вступ

Ситуаційна обізнаність (СО) англ. Situation awareness (SA) – це продукт сприйняття і усвідомлення навколишнього середовища (його елементів) та зміни з урахуванням часу, простору або інших факторів з метою прогнозування його стану в найближчому майбутньому.

Ситуаційна обізнаність є складовою частиною системи підтримки прийняття рішення та критично важливою для успішного виконання завдань. Правильно оцінена ситуація визначає найбільш ефективну послідовність дій, яку потрібно виконати.

Згідно теорії доктора Міка Ендслі щодо ситуаційної обізнаності, людина в небезпечній (складній) ситуації потребує структурований та точний процес прийняття рішень, який включає в себе виявлення, розпізнавання, зіставлення еталонів, застосування алгоритмів і формування

архетипних знань, що допомагає приймати правильні рішення [1].

СО загалом описується як три етапні рівні: сприйняття елементів навколишнього середовища, розуміння ситуації, прогнозування майбутнього стану (Рис. 1).



Рисунок 1. Модель ситуаційної обізнаності

Фази “спостереження” та “орієнтування” циклу “спостереження-орієнтація-рішення-дія” (OODA, O – observe, O – orient, D – decide, A – act), або петля Бойда можна прирівняти до СО [2]. Переможна стратегія полягає в тому, щоб “потрапити всередину” циклу OODA противника, не лише шляхом швидшого прийняття власних рішень, але й завдяки кращій системі СО, ніж у противника, змінюючи ситуацію таким чином, щоб він не міг більше її контролювати чи розуміти.

СО є динамічною конструкцією, яка змінюється в просторі і часі під зовнішнім та внутрішнім впливом. З отриманням нових даних вносяться зміни в плани та дії з метою досягнення бажаних цілей.

У військовій справі системи СО набули практичної реалізації в автоматизованих системах управління військами (АСУВ), при тому в сферах комплексного синтезу інформації (при проведенні військових операцій чи забезпеченні дій авіації) в більшій мірі стосуються досягнення тактичних цілей, а виявлення сенсу та досягнення розуміння частіше застосовуються в досягненні довгострокових стратегічних цілей.

Швидкоплинність процесів на полі бою, масштабність, технологічність озброєння, зміна методів та концепцій ведення бойових дій ставлять нові вимоги для ефективного управління військами в умовах ведення бойових дій де визначальні значення має швидкість отримання, обробки і перетворення, передачі та використання інформації, а також спосіб її зберігання. Найбільш ефективно та оптимально організувати вище зазначені процеси можуть саме АСУВ [3].

Автоматизована система управління військами – це взаємопов’язана сукупність засобів отримання та обробки інформації, передачі даних та зв’язку, яка забезпечує процеси збору, аналізу й оцінки обстановки, прийняття рішень, планування, доведення цих рішень до військ (сил) та контролю за ходом їх виконання шляхом зменшення безпосереднього втручання людини у відповідні процеси[4].

До складу АСУВ зазвичай входять наступні складові:

- підсистема управління і контролю;
- підсистема комунікацій (зв’язку);
- підсистема апаратного забезпечення (комп’ютери, устаткування тощо);
- підсистема програмного забезпечення;
- підсистема інформаційного забезпечення.

АСУВ – це не одна система, а збірний конгломерат, який може включати в себе декілька десятків автоматизованих систем різного рівня та призначення в якості окремих компонентів (підсистем) з відповідним елементним чи програмним складом.

Мета статті аналіз факторів, що мають найбільший вплив на ефективність системи ситуаційної обізнаності, яка враховує інформацію

від безпілотних авіаційних комплексів в операції угруповання об’єднаних сил.

Матеріали і методи

У даному дослідженні використовувалися різні методи оцінки ефективності системи ситуаційної обізнаності з урахуванням інформації від безпілотних авіаційних комплексів (систем) в операції угруповання об’єднаних сил, включаючи аналіз тактико-технічних характеристик, аналіз бойового застосування та метод експертних оцінок. Основними матеріалами дослідження стали офіційні дані з відкритих джерел [1-7], а також наукові статті, присвячені зазначеній тематиці [8-12].

Результати

Система ситуаційної обізнаності (ССО) забезпечує фундамент для подальшого прийняття рішень і продуктивність в роботі складної динамічної АСУВ, підтримує необхідні вхідні процеси на яких ґрунтуються правильні рішення та їх реалізація. ССО є важливим елементом для сучасних військових операцій, оскільки вони дозволяють командуванню та підрозділам отримувати точну та актуальну інформацію про поточну ситуацію на полі бою.

На сьогодні, у військових цілях, в Україні використовуються наступні системи ситуаційної обізнаності:

“Delta” – хмарна система ситуаційної обізнаності, що забезпечує військових актуальною інформацією про противника та сприяє координації сил на полі бою. Вона побудована за стандартами НАТО і використовує передові технології, такі як “cloud native environment” та “zero trust security”. Застосування “Delta” дозволяє зменшити втрати від “дружнього вогню” і підвищити ефективність застосування сил та засобів Сил оборони [5].

“GisArta” – виростає з офлайн-карт у повноцінну систему ситуаційної обізнаності для штабів. Дозволяє керувати інформацією про розташування сил противника та власних військ, що сприяє більш швидкому прийняттю рішень і точному вогневому ураженню противника [6].

Комплекс “ArtOS” призначений для автоматизованого управління вогнем артилерійських частин та підрозділів. Містить інноваційне розв’язання проблем комунікації, збору розвідувальних даних та обліку боєприпасів. Комплекс забезпечує значну оптимізацію використання наявних вогневих засобів ствольної, самохідної та реактивної артилерії, а також ракетних та мінометних батарей шляхом залучення для повітряної розвідки безпілотних літальних апаратів, що дозволяє чітко будувати систему вогневого ураження противника [7].

“Кропива” – є однією з найпоширеніших систем ситуаційної обізнаності серед артилеристів. Дозволяє швидко передавати координати ворожих цілей та завдавати удари з високою точністю. Система широко використовує розвідувальні дані,

що отримуються від безпілотних літальних апаратів [8].

Вище зазначено майже всі основні системи, що значно підвищують ефективність українських військ на полі бою, дозволяючи краще розуміти ситуацію та оперативно реагувати на зміни, проте перелік цих систем постійно розширюється.

Ефективності цих систем можна оцінювати за кількома ключовими показниками, а саме:

точність даних – вимірюється рівнем достовірності інформації, яку система надає про місцезнаходження ворожих та союзних сил, а також про стан поля бою;

швидкість обробки та передачі інформації – оцінюється часом, необхідним для збору, обробки та передачі даних від сенсорів до кінцевих користувачів;

надійність системи – визначається ступенем стабільності роботи системи та її здатністю функціонувати в умовах можливих збоїв та втручань;

зручність користування – вимірюється доступністю сприйняття інтерфейсу та легкістю, з якою користувачі можуть взаємодіяти із системою;

інтеграція з іншими системами – оцінюється здатністю ССО взаємодіяти та обмінюватися даними з іншими військовими та цивільними системами;

безпека даних – визначається рівнем захисту інформації від несанкціонованого доступу та кібератак;

адаптивність – оцінюється здатністю системи адаптуватися до змінних умов на полі бою та до нових загроз;

економічна ефективність – вимірюється вартістю розробки, впровадження та експлуатації системи у порівнянні з отриманими вигодами.

Першим етапом у досягненні СО є сприйняття елементів у середовищі шляхом моніторингу, виявлення сигналів і простого розпізнавання, які призводять до обізнаності про об'єкти, події, людей, системи, фактори навколишнього середовища та їх поточного стану (місця, умови, режими, дії). Саме на цьому етапі безпілотні літальні апарати (БПЛА) [9] виконують широкий спектр завдань в рамках системи ситуаційної обізнаності, серед яких можна виділити наступні:

розвідка і спостереження – збір розвідувальної інформації в реальному часі, що включає візуальне спостереження, фото- та відеозйомку, а також використання різних сенсорів для моніторингу;

цілевказівка – передача інформації та “підсвітка” цілей для подальшого їх ураження або спостереження за їх рухом;

патрулювання – регулярний моніторинг визначених територій для виявлення потенційних загроз або аномалій;

пошуково-рятувальні операції – пошук та рятування постраждалих в зонах конфліктів або природних катастроф;

ретранслятори – використання БПЛА для забезпечення зв'язку в умовах відсутності або недостатності наземних комунікаційних систем.

Слід зазначити, що безпілотні авіаційні комплекси не замінюють інші джерела інформації ССО, а радше доповнюють їх та відіграють ключову роль в підвищенні ефективності системи ситуаційної обізнаності завдяки своїм унікальним можливостям:

широкий радіус дії. БПЛА можуть охоплювати великі території, що значно підвищує можливості розвідки;

тривалий час перебування в повітрі. Деякі моделі БПЛА здатні залишатися в повітрі протягом тривалого часу, що дозволяє проводити безперервний моніторинг;

мінімізація ризиків для людського персоналу. Використання БПЛА знижує ризики для операторів і військових, оскільки їм не потрібно перебувати в зоні конфлікту;

мультисенсорне обладнання. БПЛА можуть бути обладнані різноманітними сенсорами, включаючи тепловізори, радіолокатори, і мультиспектральні камери.

З метою оцінювання ефективності системи ситуаційної обізнаності з використанням БПЛА пропонується підхід, що враховує основні фактори, що впливають на її функціонування (від технічних характеристик до зовнішніх факторів) і дозволяє забезпечити комплексну оцінку ефективності застосування БПЛА в операціях угруповання об'єднаних сил.

Для кожного вказаного фактора, з використанням методу експертних оцінок “методу Дельфі” [10], наведено числові показники пріоритетності, що враховують важливість показника для системи (W), його вплив (I), наявні позитивні (P) та негативні (N) чинники. Числове значення фактора (F) розраховується за формулою (1):

$$F = \frac{(W \cdot I) + P - N}{10} \quad (1)$$

Перелік факторів, що впливають на ефективність системи ситуаційної обізнаності з урахуванням інформації від безпілотних авіаційних комплексів (систем) має наступний вигляд:

1. Призначення і технічні характеристики БПЛА

1.1. Призначення БПЛА:

Розвідка і спостереження: $W - 10$; $I - 9$; $P - 8$ (висока точність даних); $N - 2$ (можливі перешкоди від погоди); $F = 9.6$;

Цілевказівка: $W - 9$; $I - 8$; $P - 7$ (швидкість і точність цілевказівки); $N - 3$ (можливі збої у зв'язку); $F = 7.6$;

Патрулювання: $W - 8$; $I - 7$; $P - 6$ (широке покриття територій); $N - 2$ (витрати на паливо/батареї); $F = 6.0$;

Пошуково-рятувальні операції: $W-8$; $I-8$; $P-9$ (можливість швидкої допомоги); $N-2$ (обмеження в важкодоступних місцях); $F=7,1$;

Комунікаційні ретранслятори: $W-7$; $I-9$; $P-8$ (покращення зв'язку); $N-3$ (залежність від умов зв'язку); $F=6,8$.

Результати оцінювання впливу фактору призначення БпЛА на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 2).

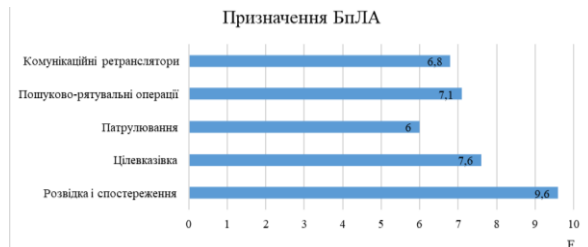


Рисунок 2. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору призначення БпЛА на ефективність ССО

1.2. Технічні характеристики:

Радіус дії та автономність: $W-9$; $I-10$; $P-8$ (великий радіус дії та тривалий час польоту); $N-2$ (можливі проблеми з батареями); $F=9,6$;

Якість сенсорів і обладнання: $W-10$; $I-9$; $P-9$ (високоякісні сенсори забезпечують точність даних); $N-3$ (можливі збої в роботі); $F=9,6$;

Стійкість до радіоелектронної боротьби: $W-8$; $I-8$; $P-7$ (захист від глушіння); $N-4$ (вразливість до нових технологій РЕБ); $F=6,7$;

Аеродинамічні схеми та компоновка: $W-8$; $I-7$; $P-6$ (оптимізована компоновка для стабільності польоту); $N-3$ (обмеження в маневреності); $F=5,9$;

Час перебування в повітрі: $W-9$; $I-8$; $P-8$ (тривалий час роботи); $N-2$ (потреба в регулярній підзарядці); $F=7,8$.

Результати оцінювання впливу фактору технічних характеристик БпЛА на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 3).



Рисунок 3. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору призначення БпЛА на ефективність ССО

2. Взаємодія БпЛА з наземними елементами ССО.

2.1. Інтеграція з наземними системами

Обмін даними в реальному часі: $W-10$; $I-10$; $P-9$ (підвищення ефективності операцій); $N-2$ (ризик втрати зв'язку); $F=10,7$;

Синхронізація з наземними сенсорами та системами управління: $W-9$; $I-9$; $P-8$ (забезпечення комплексного моніторингу); $N-2$ (складність інтеграції); $F=8,7$;

Координація дій між операторами БпЛА і наземними підрозділами: $W-9$; $I-8$; $P-7$ (покращення злагодженості дій); $N-2$ (можливі комунікаційні збої); $F=7,7$.

Результати оцінювання впливу фактору інтеграції БпЛА з наземними системами на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 4).



Рисунок 4. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору інтеграції БпЛА з наземними системами на ефективність ССО

2.2. Використання наземних комунікаційних вузлів:

Підтримка стабільного зв'язку: $W-10$; $I-9$; $P-8$ (забезпечення безперебійної роботи); $N-2$ (можливість втрати зв'язку); $F=9,6$;

Резервні комунікаційні канали: $W-8$; $I-8$; $P-7$ (підвищення надійності зв'язку); $N-3$ (додаткові витрати на резервні канали); $F=6,8$;

Захист інформації від перехоплення і глушіння: $W-9$; $I-9$; $P-7$ (забезпечення безпеки даних); $N-3$ (вразливість до нових загроз); $F=8,5$.

Результати оцінювання впливу фактору використання БпЛА наземних комунікаційних вузлів на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 5).



Рисунок 5. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору використання БпЛА наземних комунікаційних вузлів на ефективність ССО

3. Вплив зовнішніх факторів

3.1. Протидія противника

Радіoeлектронна боротьба: $W-10; I-9; P-6$ (певний рівень захисту); $N-5$ (ризик втрати управління); $F=9.1$;

Фізичне знищення БпЛА (ППО, винищувачі): $W-9; I-8; P-5$ (можливість ухилення); $N-6$ (високий ризик знищення); $F=7.1$;

Кібернетичні атаки на системи управління: $W-8; I-7; P-5$ (захист від кіберзагроз); $N-4$ (можливість злому); $F=5.7$.

Результати оцінювання впливу фактору протидії противника на БпЛА на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 6).

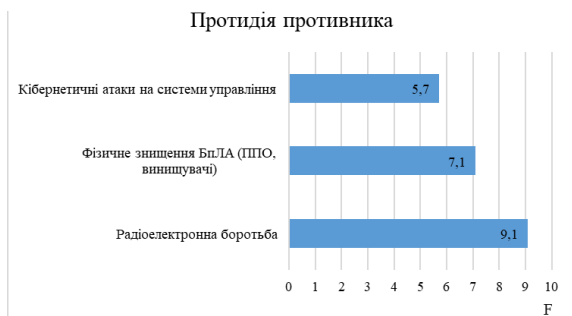


Рисунок 6. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору протидії противника на БпЛА на ефективність ССО

3.2. Погодні умови

Вітер і турбулентність: $W-8; I-7; P-4$ (певна стабільність); $N-6$ (ризик відхилень від курсу); $F=5.4$;

Опади (дощ, сніг): $W-7; I-6; P-3$ (певний захист від опадів); $N-5$ (погіршення видимості); $F=4.0$;

Туман і видимість: $W-8; I-7; P-3$ (сенсори для роботи в умовах низької видимості); $N-6$ (значне погіршення видимості); $F=5.3$;

Температурні коливання: $W-7; I-6; P-4$ (витривалість техніки); $N-4$ (вплив на батареї і сенсори); $F=4.2$.

Результати оцінювання впливу фактору протидії противника на БпЛА на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 7).

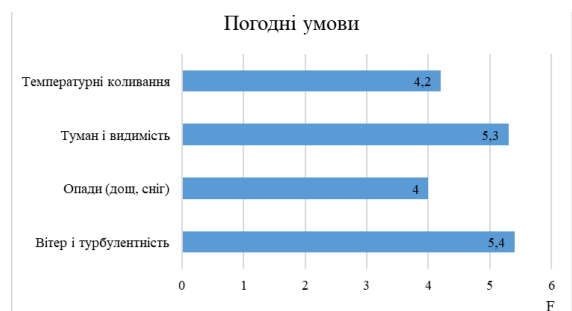


Рисунок 7. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору погодних умов на ефективність ССО

3.3. Час доби та пори року

Денні та нічні умови: $W-9; I-8; P-7$ (робота в денних і нічних умовах); $N-2$ (потреба в додатковому обладнанні для нічних операцій); $F=7.7$;

Сезонні зміни (зима, літо): $W-7; I-6; P-5$ (певна витривалість техніки); $N-4$ (вплив на роботу систем); $F=4.3$;

Довжина світлового дня: $W-6; I-5; P-4$ (вплив на планування операцій); $N-3$ (обмеження операцій в нічний час); $F=3.1$.

Результати оцінювання впливу фактору часу доби та пори року на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 8).

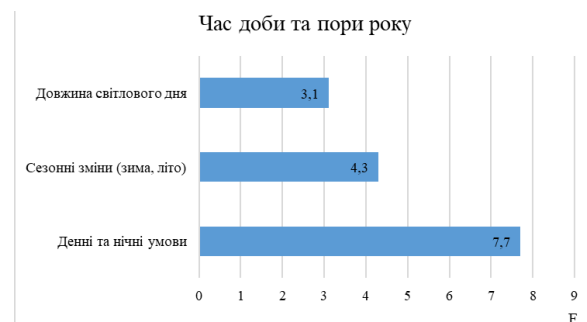


Рисунок 8. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору часу доби та пори року на ефективність ССО

3.4. Особливості місцевості

Гірська місцевість: $W-8; I-7; P-4$ (адаптація до рельєфу); $N-5$ (ускладнення зв'язку і навігації); $F=5.5$;

Лісиста місцевість: $W-8; I-7; P-4$ (використання сенсорів для проникнення через листя); $N-5$ (обмеження видимості); $F=5.5$;

Водні перешкоди: $W-7; I-6; P-3$ (можливість обльоту); $N-4$ (ризик втрати БпЛА); $F=4.1$;

Урбанізовані території: $W-9; I-8; P-6$ (використання для розвідки міських районів); $N-4$ (перешкоди для сигналів); $F=7.4$.

Результати оцінювання впливу фактору особливостей місцевості на ефективність ССО представлені на гістограмі (рис. 9).



Рисунок 9. Гістограма результатів оцінювання впливу фактору особливостей місцевості на ефективність ССО

Виходячи з результатів оцінювання найбільший вплив на ефективність ССО має група факторів “інтеграція з наземними системами” та “технічні характеристики БпЛА”, а також “використання наземних комунікаційних вузлів” (рис. 10).

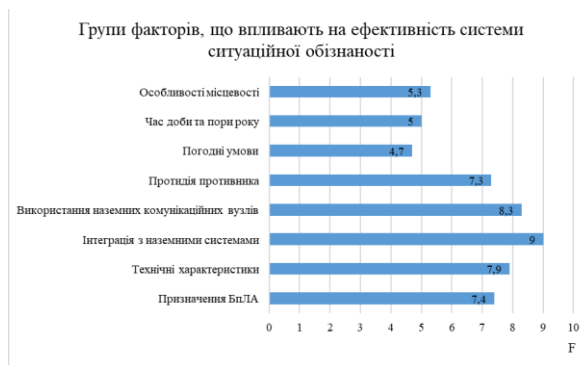


Рисунок 10. Гістограма результатів оцінювання впливу груп факторів на ефективність ССО

Зовнішні фактори, такі як погодні умови і протидія противника, мають значний вплив на ефективність, проте можуть бути частково компенсовані відповідними заходами захисту і адаптації.

Обговорення

На сьогодні, окрім перерахованих вище, у Збройних Силах України [11, 12] використовується декілька абсолютно різних АСУ та ССО – “Дзвін” (управління та контроль стратегічного рівня), “Ореанда ПС” (авіація та ППО), СПЗ “Віраж-планшет” (відстеження повітряного простору), “Гермес-С2” (управління тактичного рівня) та інші. Проте фактично на озброєнні, в обмеженій кількості, прийнята лише АСУВ “Дзвін”, АСУ “Ореанда ПС” та СПЗ “Віраж-планшет”, ведуться роботи щодо прийняття на озброєння ССО “Дельта”. Решта систем використовуються або в якості експерименту, або в якості волонтерської допомоги.

Отже:

АСУВ у Збройних Силах України є; вони успішно застосовуються; їх досить мало;

їхній вплив та значення мають фрагментарний характер;

кожна з зазначених систем має певні особливості внаслідок чого їх не можна поєднати ні програмно ні апаратно в одну єдину АСУ [13].

Основні проблеми щодо впровадження АСУ не скільки технічного характеру, а більше адміністративного характеру.

Щодо інтеграції безпілотних авіаційних комплексів в сучасні системи ситуаційної обізнаності поля бою або автоматизовані системи управління військами то все, що зручно, ефективно та необхідно впроваджується оперативно або вдосконалюється за аналізом досвіду російсько-української війни (до та після повномасштабного вторгнення).

Важливість застосування БпЛА в якості елемента системи ситуаційної обізнаності поля бою у перелічених АСУ та ССО для виявлення та

ідентифікації наземних цілей, контролю обстановки на полі бою не підлягає сумніву.

Висновок

З урахуванням існуючих вимог в сучасних реаліях ведення бойових дій питання щодо розробки та введення в експлуатацію АСУВ з системами ситуаційної обізнаності є не просто актуальним, а життєво необхідним. За рахунок застосування безпілотних авіаційних комплексів, які мають високі технічні та експлуатаційні характеристики, гнучкість в застосуванні і доступність в масштабованості, ССО мають значну ефективність.

Відповідно до мети досліджень, ключовими результатами оцінювання ефективності системи ситуаційної обізнаності за рахунок застосування безпілотних авіаційних комплексів є:

підвищення ефективності розвідки. Застосування БпЛА можуть значно підвищити якість та оперативність збору розвідувальної інформації. Можливість отримувати високоякісні зображення та відео в режимі реального часу, що сприяє швидшому виявленню загроз та ухваленню відповідних рішень;

зниження ризиків. Зменшення необхідності направлення живої сили в небезпечні зони для розвідки, що сприяло збереженню життів військовослужбовців;

ефективність координації. Системи ситуаційної обізнаності з використанням БпЛА покращили координацію між підрозділами, забезпечивши краще узгодження дій та підвищення загальної оперативної ефективності;

виявлення та знищення цілей. Більш точне виявлення і знищення ворожих цілей завдяки точній геолокації та спостереженню за ситуацією на полі бою.

Виходячи з результатів оцінювання факторів, найбільший вплив на ефективність ССО мають групи факторів, такі як:

“технічні характеристики БпЛА” (радіус дії та автономність, якість сенсорів і обладнання, стійкість до радіоелектронної боротьби та час перебування в повітрі);

“інтеграція з наземними системами” (обмін даними в реальному часі, синхронізація з наземними сенсорами та системами управління, координація дій між операторами БпЛА і наземними підрозділами).

Список використаних джерел

1. Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting (pp. 97-101). Santa Monica, CA: Human Factors Society.

2. Watts, B.D. (2004). Chapter 9: “Situation awareness” in air-to-air combat and friction. Clausewitzian Friction and Future War, McNair Paper no. 68. Institute of National Strategic Studies, National Defense University.

3. Указ Президента України “Рішення Ради національної безпеки і оборони України. Про Стратегію воєнної безпеки України” № 121/2021. – К.: Адміністрація Президента України, 2021. – 16с.

4. Автоматизовані інформаційні системи органів управління військами : монографія / Вернер І. Є. та ін. Київ, 2014. С. 79.

5. Україна представила власну систему ситуаційної обізнаності “Delta” // MILITARNYI [Електронний ресурс]. 27.10.2022. – URL: <https://mil.in.ua/uk/news/ukrayina-predstavyla-vlasnu->

systemu-sytuatsijnoyi-obiznanosti-delta/.

6. ГІС "АРТА" автоматизована система управління військами // ГІС "АРТА" [Електронний ресурс]. – URL: <https://gisarta.org/uk/index.html>.

7. ArtOS – точно в ціль // ArtOS [Електронний ресурс]. 2024. – URL: <https://artos.tech/uk/>.

8. Бойова система управління тактичної ланки "Кропива" на службі ЗСУ та НГУ // Defense Express [Електронний ресурс]. 06.07.2020. – URL: https://defence-ua.com/news/bojova_sistema_upravlinnja_taktichnoji_lanki_kropiva_na_sluzhbi_zsu_ta_ngu_foto-1129.html.

9. Апарати літальні безпілотні. Основні терміни та визначення понять. Класифікація. ДСТУ В 7371:2023. –

Київ.: "ДП УкрНДНЦ", 2023. – 4 с.

10. Метод Дельфі (Delphi method) // Zosym Maxym [Електронний ресурс]. 26.05.2023. – URL: <https://www.maxzosim.com/delphi-method/>

11. Автоматизована система управління військами – зброя перемог // Військовий кур'єр [Електронний ресурс]. 03.12.2022. – URL:

<https://mil.co.ua/avtomatyzovana-systema-upravlinnya-vijskamy-zbroya-peremogy/>

12. Автоматизація за наказом // Defense Express [Електронний ресурс]. 24.02.2020. – URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/avtomatizatsija_za_nakazom-239.html.

Oleksandr Lutseyvat

<https://orcid.org/0009-0001-2435-5434>

Igor Voloshyn (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0009-0003-9315-5246>

Yaroslav Yaroshenko (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

Oleksandr Rohovets

<https://orcid.org/0009-0000-0880-2102>

The National Defence university of Ukraine, Kyiv, Ukraine

THE FACTORS AFFECTING OF THE SITUATION AWARENESS SYSTEM EFFECTIVENESS TAKING INTO ACCOUNT INFORMATION FROM UNMANNED AVIATION SYSTEMS IN THE UNITED FORCES GROUP OPERATION

The peculiarities of full-scale armed aggression from the Russian Federation, resource limitations, the change in existing forms and methods of deploying military groups under the influence of modern weapons and technology, and the extensive use of unmanned (uncrewed) vehicles necessitate the development of automated command and control systems for troops and weapons, rational planning, and efficient use of available resources. Additionally, there is a need to find new methods to enhance the effectiveness of forces and means in contemporary conditions of reconnaissance and enemy engagement.

Given the relevance of the raised issue, the article, in general terms, discusses the concept of situational awareness, the features of situational awareness systems, their place in automated command and control systems (weapons), and lists and analyzes factors affecting the effectiveness of situational awareness systems through the use of unmanned aerial systems.

The aim of this article is to highlight, examine, and provide numerical values for the factors that may most significantly impact the effectiveness of the situational awareness system through the use of unmanned aerial systems in the operation of the Joint Forces group. The article will be useful for teachers and scientific and pedagogical workers who conduct research in the field of military management and decision support systems.

Keywords: *situational awareness, situational awareness systems, factors, effectiveness, unmanned aerial systems, unmanned aerial vehicles.*

References

1. Endsley, M. R. (1988). Design and evaluation for situation awareness enhancement. Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting (pp. 97-101). Santa Monica, CA: Human Factors Society.

2. Watts, B.D. (2004). Chapter 9: 'Situation awareness' in air-to-air combat and friction. Clausewitzian Friction and Future War, McNair Paper no. 68. Institute of National Strategic Studies, National Defense University.

3. Decree of the President of Ukraine "Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine. On the Military Security Strategy of Ukraine" No. 121/2021. - K.: Administration of the President of Ukraine, 2021. - 16 p.

4. Automated Information Systems of Military Command Organs: Monograph / I. E. Werner et al. Kyiv, 2014. P. 79.

5. Ukraine presented its own situational awareness system "Delta" // MILITARNYI [Electronic resource]. 27.10.2022. – URL: <https://mil.in.ua/uk/news/ukrayina-predstavyla-vlasnu-systemu-sytuatsijnoyi-obiznanosti-delta/>.

6. ГІС "АРТА" automated command and control system // ГІС "АРТА" [Electronic resource]. – URL: <https://gisarta.org/uk/index.html>.

7. ArtOS – accurate to the target // ArtOS [Electronic resource]. 2024. – URL: <https://artos.tech/uk/>.

8. Tactical level command and control system "Kropyva" in service with the Armed Forces and National Guard of Ukraine // Defense Express [Electronic resource]. 06.07.2020. – URL: https://defence-ua.com/news/bojova_sistema_upravlinnja_taktichnoji_lanki_kropiva_na_sluzhbi_zsu_ta_ngu_foto-1129.html.

9. Unmanned aerial vehicles. Basic terms and definitions. Classification. DSTU V 7371:2023. – Kyiv: "State Enterprise UkrNDNC", 2023. – 4 pages.

10. Delphi method // Zosym Maxym [Electronic resource]. 05/26/2023. – URL: <https://www.maxzosim.com/delphi-method/>

11. Automated command and control system – the weapon of victories // Military Courier [Electronic resource]. 03.12.2022. – URL: <https://mil.co.ua/avtomatyzovana-systema-upravlinnya-vijskamy-zbroya-peremogy/>

12. Automation on order// Defense Express [Electronic resource]. 24.02.2020. – URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/avtomatizatsija_za_nakazom-239.html.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-31-35

УДК 629.7.07(078)

¹Коцюруба Андрій Васильович
<https://orcid.org/0000-0001-5150-6683>

¹Радько Олег Віталійович (кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник)
<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

¹Бочарніков Віктор Павлович (доктор технічних наук, професор)
<https://orcid.org/0000-0003-4398-5551>

²Пустовий Сергій Олексійович (кандидат технічних наук, старший науковий співробітник)
<https://orcid.org/0009-0008-2038-1046>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²ТОВ "АдронДАМ", Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОПАРАМЕТРИЧНОГО ТА ТРИПАРАМЕТРИЧНОГО ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ВЕЙБУЛЛА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ ВІЙСЬКОВОЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

У статті представлено результати порівняльного аналізу двопараметричного та трипараметричного законів розподілу Вейбулла для з'ясування впливу третього параметра на прогнозування безвідмовної роботи військової авіаційної техніки. У якості вихідних даних, для проведення розрахунків функцій розподілу часу, щільностей ймовірності, інтенсивностей відмов, ймовірностей безвідмовної роботи двопараметричного та трипараметричного законів розподілу Вейбулла, були використані реальні статистичні дані. Встановлено вплив порогового параметру (параметра зсуву) на розподіл часу до відмови та як наслідок – на можливість моделей технічного обслуговування зразків військової авіаційної техніки точніше відображати реальні умови експлуатації та створювати оптимальні графіки їх обслуговування.

Ключові слова: військова авіаційна техніка, час безвідмовної роботи, трипараметричний розподіл Вейбулла, параметр положення.

Вступ

Для вирішення завдань підвищення ефективності процесу технічного обслуговування військової авіаційної техніки (ВАТ), як у мирний час, так і в умовах особливого періоду [1], використовується цілий ряд моделей відмов [2]. Відмови повітряних суден (ПС) призводять до невиконання бойових завдань, значних витрат фінансових, технічних та інших ресурсів, необхідність проведення відновлювальних робіт і пов'язаних з ними простоїв ПС [3]. Крім того, недостатня надійність ПС негативно впливає на безпеку їх експлуатації [4]. Вибір закону розподілу часу безвідмовної роботи дійсно є критичним при розробці математичних моделей обслуговування зразків ВАТ та суттєво впливає на точність оцінок, які отримуються в ході моделювання [5, 6].

Отже, правильний вибір закону розподілу часу безвідмовної роботи та результати його застосування можуть значно підвищити ефективність і безпеку експлуатації авіаційної техніки (АТ).

Розподіл часу безвідмовної роботи при зношуванні, яке є характерним для старіючого парку ПС, може бути задовільно описаний розподілом Вейбулла [6]. Закон Вейбулла або закон масового випадку використовується для опису випадкових подій, які виникають з високою частотою і є таким, що широко використовується через його гнучкість та здатність описувати різні типи відмов, що відбуваються на різних стадіях життєвого циклу компонентів [2]. Цей закон дозволяє моделювати час до відмови з

урахуванням параметрів форми та масштабу [2, 7].

У контексті АТ, закон Вейбулла може бути використаний для аналізу надійності та моделювання відмов або збоїв, які виникають в різних її системах [8]. Це важливо для ВАТ, оскільки дозволяє врахувати початковий період безвідмовної роботи (час наробітку на відмову) нових або заміненних компонентів, а також вплив різних умов експлуатації на надійність [7].

Приклад застосування двопараметричного закону Вейбулла при моделюванні технічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки розглянуто у роботі [9]. В той же час, на сьогоднішній день можливість застосування трипараметричного закону розподілу Вейбулла, який додає ще один параметр до класичного двопараметричного розподілу, для складних технічних систем, до яких відноситься ВАТ, не розглянуто. Третій параметр – це порогове значення, яке зміщує розподіл на горизонтальній осі, дозволяючи моделювати ситуації, де відмови не виникають до певного моменту часу. Вважається, що це забезпечує більшу гнучкість при моделюванні [8].

Враховуючи зазначене, метою статті є порівняльний аналіз двопараметричного та трипараметричного законів розподілу Вейбулла для з'ясування впливу третього параметра на прогнозування безвідмовної роботи ВАТ [10].

Матеріали та методи

Під час написання статті застосовано загальнонауковий теоретичний метод наукового пізнання – порівняльний аналіз. Порівняльний аналіз

застосовувався для встановлення схожих і відмінних характеристик двопараметричного та трипараметричного розподілів Вейбулла щодо прогнозування показників безвідмовності для ВАТ, а також для визначення переваг й недоліків врахування третього параметру розподілу Вейбулла напрацювання на відмову при створенні математичної моделі технічного обслуговування АТ.

Результати

Двопараметричний закон розподілу Вейбулла задається двома параметрами: параметром масштабу (a), який визначає характерний час або середню тривалість безвідмовної роботи та параметром форми (b), який визначає поведінку інтенсивності відмов виробу із часом.

Трипараметричний закон Вейбулла використовує додатково третій параметр – пороговий (параметр положення) (t_0), який визначає наробіток, до якого немає відмов [2, 8].

Для з'ясування впливу третього параметру розподілу Вейбулла на характеристики безвідмовності АТ, проведемо порівняльний аналіз двопараметричного та трипараметричного законів. У якості вихідних даних використані реальні статистичні дані, отримані за результатами експлуатації зразків ВАТ:

1. Параметр форми – b , безрозмірна величина, яка визначає поведінку інтенсивності відмов виробу із часом: $b < 1$ – падаюча інтенсивність відмов (період приробітку), $b = 1$ – постійна інтенсивність відмов із часом експлуатації (період нормальної експлуатації), $b > 1$ – зростаюча із часом експлуатації інтенсивність відмов (старіння та знос) [2]. Враховуючи реальний стан парку ВАТ України, розрахунки проведемо при наступних значеннях параметру форми:

$$b = 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0.$$

2. Параметр масштабу (ресурс) – a , год. Розрахунок параметру масштабу виконано за

формулою його взаємозв'язку із середнім напрацюванням на відмову T_{cp} , що наведена у таблиці 1 [11] для розподілу Вейбулла:

$$a = \frac{T_{cp}}{\Gamma(1 + \frac{1}{b})} \quad (1)$$

де $T_{cp} = 1773$ календарних год (відповідає 13,82 год нальоту при інтенсивності польотів $7,7966 \cdot 10^{-3}$ год нальоту / календарну годину або 128,3 календарних год / год нальоту) при заданому параметрі форми b ;

$\Gamma(\cdot)$ – гама-функція.

3. Параметр положення (параметр зсуву або мінімальний ресурс) – t_0 , год. При розрахунках заданий у календарних годинах та визначає наробіток повітряного судна (ПС) до якого відмови відсутні:

$$t_0 = 257 \text{ календарних год (відповідає 2 год нальоту).}$$

Для порівняльного аналізу проведемо розрахунки функцій розподілу часу, щільностей ймовірності, інтенсивностей відмов, ймовірностей безвідмовної роботи та побудуємо графіки для двопараметричного та трипараметричного законів розподілу Вейбулла відповідно при зазначених вище значеннях коефіцієнтів масштабу a , форми b та параметрі положення t_0 :

1. Функція розподілу часу напрацювання ПС на відмову – для двопараметричного $F_2(t)$ та трипараметричного $F_3(t)$ законів розподілу Вейбулла (рис. 1):

$$F_2(t, a, b) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \quad (2)$$

$$F_3(t, a, b, t_0) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{a}\right)^b} \quad (3)$$

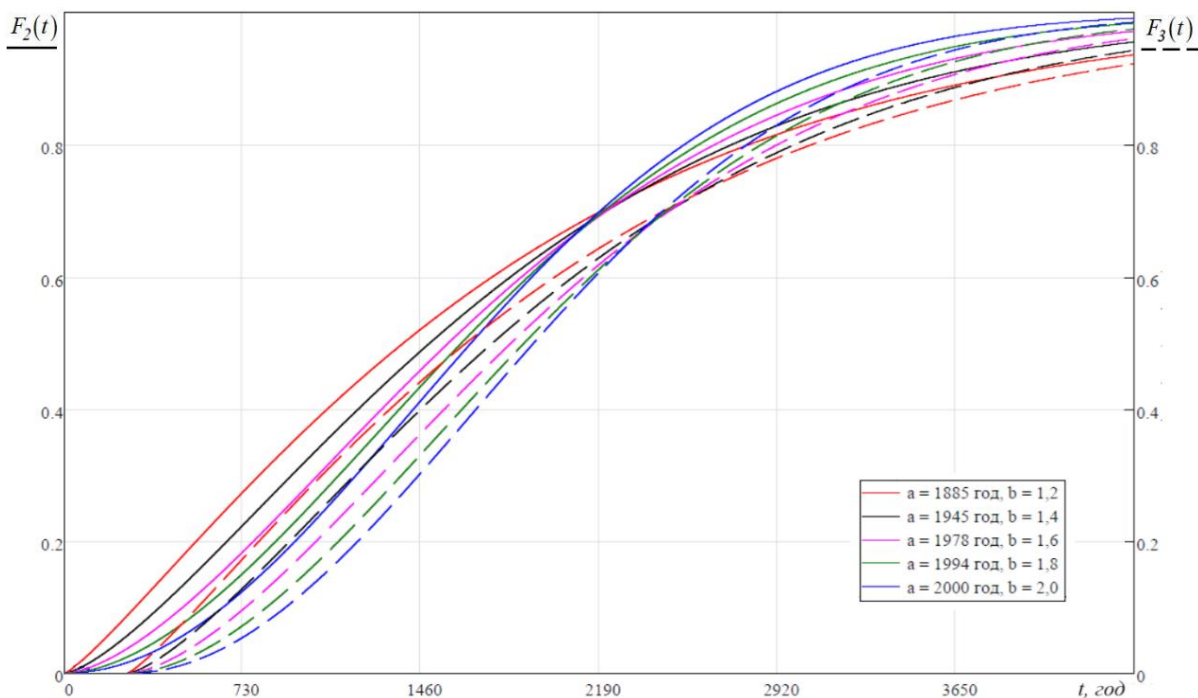


Рисунок 1. Порівняння функцій розподілу двопараметричного $F_2(t)$ (—) та трипараметричного $F_3(t)$ (---) законів розподілу Вейбулла

2. Щільності ймовірностей двопараметричного $f_2(t)$ та трипараметричного $f_3(t)$ законів розподілу Вейбулла (рис. 2):

$$f_2(t, a, b) = \frac{d}{dt} F_2(t, a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \quad (4)$$

$$f_3(t, a, b, t_0) = \frac{d}{dt} F_3(t, a, b, t_0) = \frac{b}{a} \left(\frac{t-t_0}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{a}\right)^b} \quad (5)$$

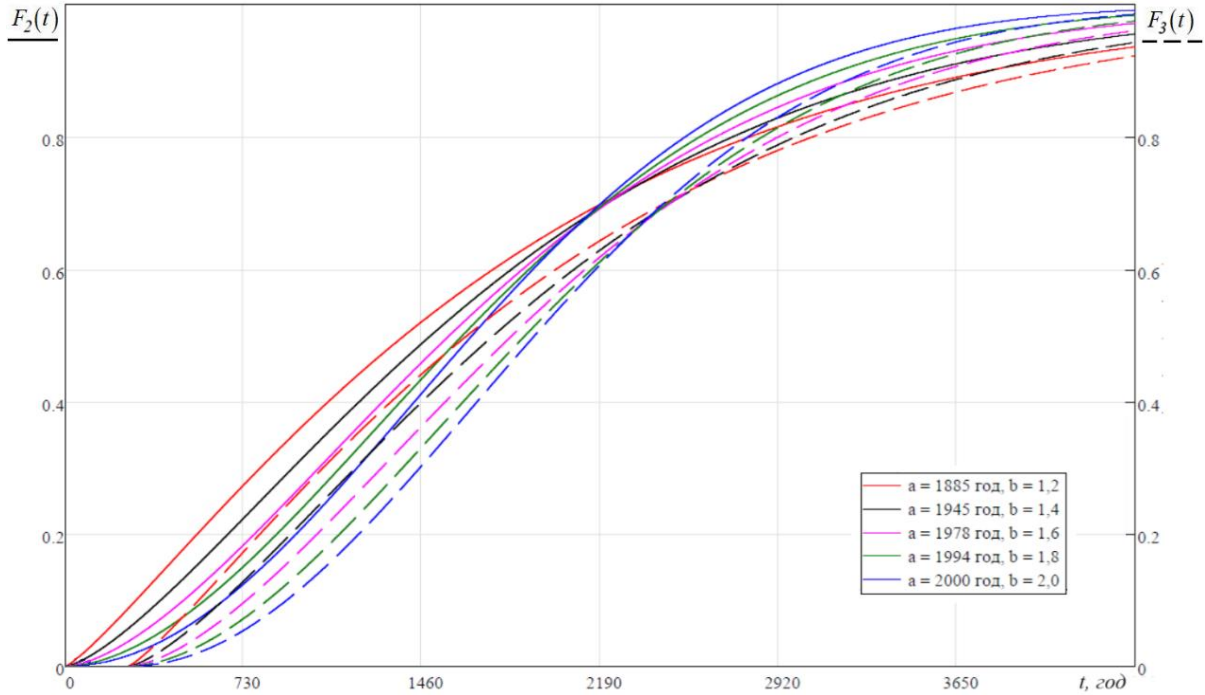


Рисунок 2. Порівняння щільності ймовірностей для двопараметричного $f_2(t)$ (—) та трипараметричного $f_3(t)$ (---) законів розподілу Вейбулла

3. Інтенсивності потоків відмов двопараметричного $\lambda_2(t)$ та трипараметричного $\lambda_3(t)$ законів розподілу Вейбулла (рис. 3):

$$\lambda_2(t, a, b) = \frac{f_2(t, a, b)}{1 - F_2(t, a, b)} = \frac{b}{a^b} t^{b-1} \quad (6)$$

$$\lambda_3(t, a, b, t_0) = \frac{f_3(t, a, b, t_0)}{1 - F_3(t, a, b, t_0)} = \frac{b}{a^b} t^{b-1} = \frac{b}{a^b} (t-t_0)^{b-1} \quad (7)$$

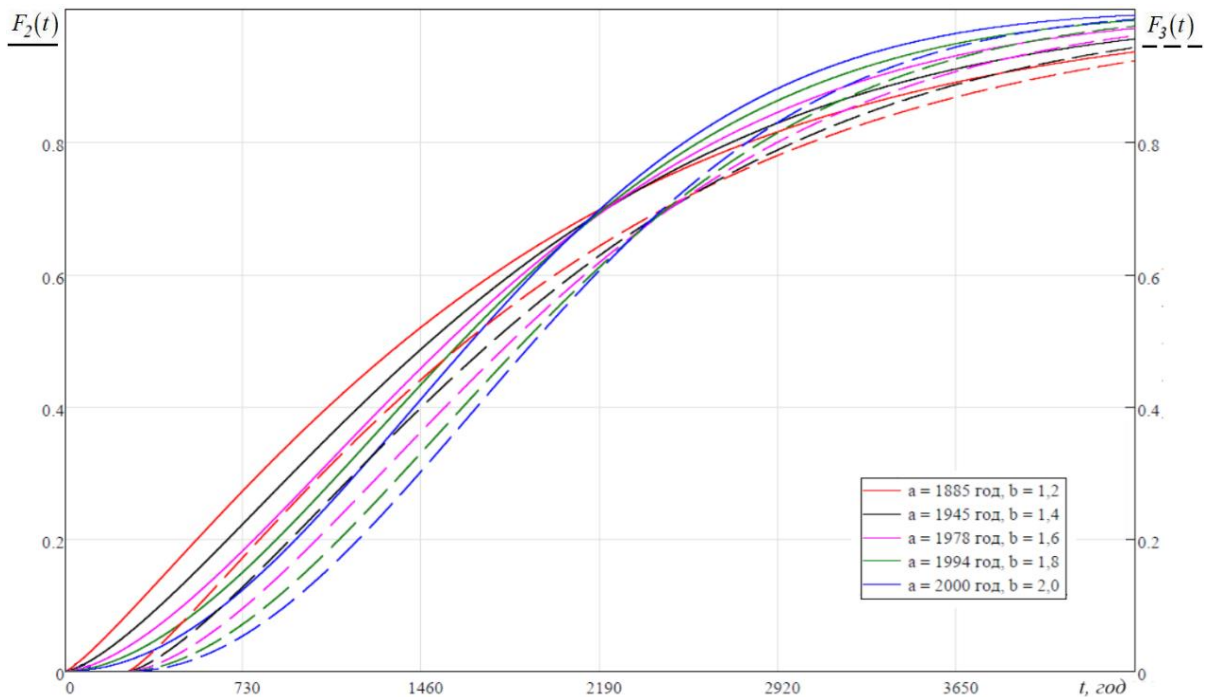


Рисунок 3. Порівняння інтенсивності відмов для двопараметричного $\lambda_2(t)$ (—) та трипараметричного $\lambda_3(t)$ (---) законів розподілу Вейбулла

4. Ймовірності безвідмовної роботи двопараметричного $P_2(t)$ та трипараметричного $P_3(t)$ законів розподілу Вейбулла (рис. 4):

$$P_2(t, a, b) = 1 - F_2(t, a, b) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \quad (8)$$

$$P_3(t, a, b, t_0) = 1 - F_3(t, a, b, t_0) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{a}\right)^b} \quad (9)$$

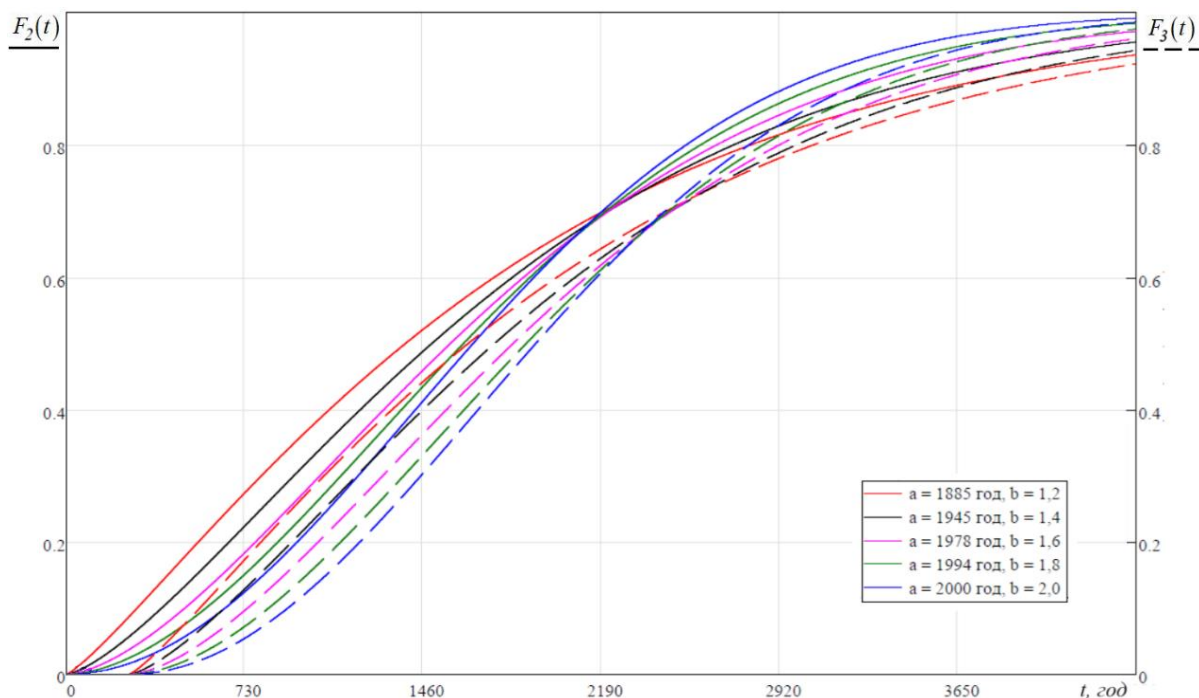


Рисунок 4. Порівняння ймовірності безвідмовної роботи для двопараметричного $P_2(t)$ (—) та трипараметричного $P_3(t)$ (---) законів розподілу Вейбулла

Обговорення

В ході дослідження встановлено, що параметр зсуву (параметр положення) враховує мінімальний час до відмови, що дозволяє моделі відмов точніше відображати реальні умови експлуатації.

Введення параметра зсуву зміщує весь розподіл часу до відмови на фіксовану величину. Це означає, що всі відмови відбуваються після певного мінімального часу, що може бути суттєво важливим при плануванні технічного обслуговування та заміни компонентів.

Додавання параметра зсуву дозволяє моделі відмов краще відповідати емпіричним даним, що покращує точність прогнозів щодо безвідмовної роботи. Це особливо корисно для прогнозування часу безвідмовної роботи складних систем та об'єктів, до яких відноситься ВАТ, на різних етапах їх експлуатації (введення в експлуатацію, технічне обслуговування, ремонт, зберігання, виведення з експлуатації).

Висновки

Проведені розрахунки показують, що застосування трипараметричного закону Вейбулла на відміну від двопараметричного дозволяє:

моделювати різні етапи життєвого циклу зразка ВАТ. Так, додавання параметра положення відображає період, коли відмови не відбуваються, що особливо доцільно для нових або нещодавно відремонтованих зразків АТ, які мають початковий період безвідмовної роботи;

адаптуватись до різних експлуатаційних умов. Зміщення розподілу відмов дозволяє більш

адекватно моделювати реальні умови використання АТ;

покращити точність прогнозів. Врахування трьох параметрів (форма, масштаб, порогове значення) дає більш точні результати прогнозу, що за певних умов дозволяє при моделюванні відмов щільніше наблизитись до реальних статистичних даних зразка ВАТ;

оптимізувати обслуговування. Краща гнучкість моделі відмов дозволяє розраховувати більш достовірні оптимальні графіки обслуговування кожного типу ВАТ.

Список використаних джерел

1. А. В. Коцюруба, О. В. Радько, І. І. Волошин, та І. П. Коровін. "Аналіз впливу умов особливого періоду на систему технічного обслуговування і ремонту повітряних суден авіації Збройних Сил України", Труды університету, № 1(183), с. 14-24, 2024.
2. Надійність техніки. Моделі відмов, ДСТУ 3433-96: УкрНДНЦ, Київ, Україна, 1997.
3. А. О. Калиновський, "Дослідження методів економічної оцінки якості відновлення авіаційної техніки", Науковий вісник НЛТУ України, Вип. 19.10, с. 179-185, 2009.
4. О. В. Радько, Б. Й. Семон, С. М. Коротін, та А. В. Коцюруба "Організація експлуатації військової авіаційної техніки", Київ, Україна: НУОУ, 2023.
5. О. Кучер, та П. Власенко, "Контроль та аналіз стану надійності систем і агрегатів повітряних суден в експлуатації", Наукоємні технології, №1(15), лист. 2010, с. 15-26, doi: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.5.5025>.
6. Л. В. Волох, "Порівняльний аналіз основних законів розподілу при дослідженні надійності технічних

об'єктів та систем”, Collection of scientific papers “SCIENTIA”, Sofia, Republic of Bulgaria. p. 74–76. Oct. 20, 2023.

7. IEC 61649:2008. Weibull analysis. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5698>.

8. M. Fidanoglu, U. Ungor, I. Ozkol. “Application of Weibull Distribution Method for Aircraft Component Life Estimation in Civil Aviation Sector”, Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 5, No. 1, June 2017, doi:10.18178/jtle.5.1.40-44.

9. П. В. Опенько, П. М. Яблонський, М. Ю. Миронюк, О. О. П'явчук та А. Г. Козир “Математична модель технічного обслуговування зразків озброєння та

військової техніки з використанням розподілу часу безвідмовної роботи виробів у вигляді закону Вейбулла”, Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Вип. № 2(12), С. 93-108, 2022, doi: 10.37701/dndivsovt.12.2022.10.

10. Надійність техніки. Терміни та визначення, ДСТУ 2860-94: УкрНДНЦ, Київ, України, 1996.

11. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги, ДСТУ-2862-94: УкрНДНЦ, Київ, України, 1997.

¹Andrii Kotsiuruba

<https://orcid.org/0000-0001-5150-6683>

¹Oleg Radko (PhD of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Research Scientist)

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

¹Viktor Bocharnikov (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-4398-5551>

²Serhii Pustoyvi (PhD of Engineering Sciences, Senior Research Scientist)

<https://orcid.org/0009-0008-2038-1046>

¹National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Adron DAM LLC, Kyiv, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF TWO-PARAMETER AND THREE-PARAMETER WEIBULL DISTRIBUTION FOR PREDICTING RELIABILITY INDICATORS OF MILITARY AIRCRAFTS

The article presents the results of a comparative analysis of the two-parameter and three-parameter Weibull distribution laws to determine the impact of the third parameter on the prediction of the reliable operation of military aviation equipment. Real statistical data were used as input data for calculating the distribution functions of time, probability densities, failure intensities, and reliability probabilities of the two-parameter and three-parameter Weibull distribution laws. The influence of the threshold parameter (shift parameter) on the time-to-failure distribution and, consequently, on the ability of maintenance models of military aviation equipment samples to more accurately reflect real operating conditions and create optimal maintenance schedules was established.

Keywords: military aviation equipment, time to failure, three-parameter Weibull distribution, location parameter.

References

1. A. V. Kocjuruba, O. V. Radjko, I. I. Voloshyn, та I. P. Korovin. “Analiz vplyvu umov osoblyvogo periodu na systemu tekhnichnogo obslughovuvannya i remontu povitryanykh suden aviaciji Zbrojnykh Syl Ukrainy”, Trudy universytetu, № 1(183), c. 14-24, 2024.

2. Nadijnistj tekhniky. Modeli vidmov, DSTU 3433-96: UkrNDNC, Kyjiv, Ukrainy, 1997.

3. A. O. Kalynovs'kyj, “Doslidzhennja metodiv ekonomichnoji ocinky yakosti vidnovlennja aviacijnoji tekhniky”, Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy”, Vyp. 19.10, s. 179-185, 2009.

4. O. V. Radjko, B. J. Semon, S. M. Korotin, та A. V. Kocjuruba “Orghanizacija ekspluataciji vijskovoji aviacijnoji tekhniky”, Kyjiv, Ukrainy: NUOU, 2023.

5. O.Kucher, та P. Vlasenko, “Kontrolj ta analiz stanu nadijnosti system i aghreghativ povitryanykh suden v ekspluataciji”, Naukojemni tekhnologhiji, #1(15), lyst. 2010, s. 15–26, doi: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.5.5025>.

6. L. V. Volokh, “Porivnjalnjy analiz osnovnykh zakoniv rozpodilu pry doslidzhenni nadijnosti tekhnichnykh ob'ektiv ta system”, Collection of scientific papers “SCIENTIA”, Sofia, Republic of Bulgaria. p. 74–76. Oct. 20, 2023. Дата звернення: 10 лист. 2024. Available: [https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/25268/3/50-](https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/25268/3/50-91-PB-75-77.pdf)

91-PB-75-77.pdf

7. IEC 61649:2008. Weibull analysis. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/5698>.

8. M. Fidanoglu, U. Ungor, I. Ozkol. “Application of Weibull Distribution Method for Aircraft Component Life Estimation in Civil Aviation Sector”, Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 5, No. 1, June 2017, doi:10.18178/jtle.5.1.40-44.

9. P. V. Openjko, P. M. Jablons'kyj, M. Ju. Myronjuk, O. O. P'javchuk та A. Gh. Kozyr “Matematychna modelj tekhnichnogo obslughovuvannya zrazkiv ozbrojennja ta vijskovoji tekhniky z vykorystannjam rozpodilu chasu bezvidmovnoji roboty vyrobiv u vyghljadi zakonu Vejbulja”, Zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogo naukovо-doslidnogo instytutu vyprobuvanj i sertyfikacij ozbrojennja та vijskovoji tekhniky, Vyp. # 2(12), S. 93-108, 2022, doi: 10.37701/dndivsovt.12.2022.10.

10. Nadijnistj tekhniky. Terminy та vyznachennja, DSTU 2860-94: UkrNDNC, Kyjiv, Ukrainy, 1996.

11. Nadijnistj tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadijnosti. Zagaljni vymoghy, DSTU-2862-94: UkrNDNC, Kyjiv, Ukrainy, 1997.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-36-42

УДК 358.4

Горбенко Володимир Михайлович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-7030-0995>

Кіреєнко Володимир Володимирович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-0230-9450>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВАЖЛИВОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ В ПРОЦЕСІ ПЛАНУВАННЯ ОПЕРАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ

В статті розглянуто методику визначення важливості об'єктів протиповітряної оборони з використанням методу факторного аналізу, а саме CVRT-методу. Досвід ведення протиповітряної оборони України з початку широкомасштабного вторгнення російської федерації свідчить про тенденції щодо постійної зміни тактики засобів повітряного нападу противника, перенесення акцентів його ракетно-авіаційних ударів на різні групи важливих державних та військових об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури і навіть на цивільне населення. Це свідчить, що важливість критичних об'єктів, як комплексний показник, не може бути постійною величиною, яка була визначена ще до початку війни. Його значення має бути адаптивним під реалії обстановки, що скалася, прогнозується та постійно змінюється, мати чіткий і зрозумілий механізм для його розрахунку. Саме це має забезпечити відсутність упередженості й суб'єктивності в прийнятті рішень та стати необхідною умовою для якісного планування протиповітряної оборони і оцінювання її ефективності в операціях.

У роботі розкрито основні положення щодо змісту процедур визначення важливості критичних об'єктів з використанням CVRT-методу, прийнятого у процесі планування операцій збройних сил країн НАТО. Визначені мета, завдання, пропозиції щодо розподілу сил та засобів ППО з врахування факторів, які були отримані під час оцінювання важливості критичних об'єктів.

Розглянуті ключові показники що визначають важливість критичних об'єктів, їх характеристики та критерії оцінювання. Проведено аналіз застосування CVRT-методу для визначення важливості критичних об'єктів в процесі планування операцій за стандартами НАТО.

Ключові слова: важливість об'єкту, ефективність, оцінювання, протиповітряна оборона, процес планування операцій, факторний аналіз, CVRT-метод.

Вступ

Широкомасштабне вторгнення російської федерації, як і прогнозувалося, почалося з комбінованих ракетно-авіаційних ударів на усю глибину території України [1-5]. Протистояння між засобами повітряного нападу та засобами протиповітряної оборони триває і набуло особливого значення. Не дивлячись на кількісно-якісну перевагу, противнику не вдалося досягнути мети повітряно-наступальної операції – завоювати панування в повітрі. Його фронтовій та армійській пілотованій авіації довелося перейти до дистанційних ударів із застосуванням авіаційних ракет та плануючих авіабомб без перетину лінії бойового зіткнення. Проте застосування крилатих ракет повітряного, наземного та морського базування, ударних БпЛА (дронів-камікадзе), балістичних оперативно-тактичних та сучасних аеробалістичних ракет дає можливість противнику продовжувати здійснювати стратегічні удари по критичним об'єктам на усій території України [2, 3]. Сьогодні під ударами з повітря знаходяться не тільки важливі державні та військові об'єкти, а й об'єкти критичної інфраструктури і навіть

цивільне населення. Перелік груп об'єктів, що потрапляють під ракетно-авіаційні удари противника, постійно зростає. Ворог постійно змінює тактику комбінованих ракетно-авіаційних ударів, збільшує кількість та номенклатуру засобів повітряного нападу [5, 6]. Не дивлячись на постійну воєнно-технічну допомогу країн-партнерів, в умовах обмежених ресурсів сил та засобів ППО не можливо ефективно прикрити всі критичні об'єкти на території України. Тому завдання щодо визначення важливості об'єктів, які потребують протиповітряного та протиракетного прикриття є надзвичайно важливим. Зазначені обставини вимагають пошуку та розроблення нових підходів до визначення та оцінювання важливості критичних об'єктів, їх ранжування за ознакою пріоритетності з метою забезпечення ефективного прикриття від ракетно-авіаційних ударів противника [7-9].

Мета статті – на підставі аналізу існуючих методик, які застосовуються військовими фахівцями країн членів НАТО в процесі оперативного планування, розглянути особливості застосування методу факторного аналізу для

визначення важливості об'єктів протиповітряної оборони в операціях.

Матеріали та методи

Під час написання статті застосовано загальнонауковий теоретичний метод наукового пізнання – порівняльний аналіз.

Результати

Відповідно до структури процесу планування операцій (Operations Planning Process – OPP) в межах фази 3 – оцінювання оперативної обстановки (Operational Estimate), група планування об'єднаних операцій (Joint Operations Planning Group – JOPG) або командна група (Command Group – CG) здійснює аналіз, уточнює суму факторів, і за яких умов, що матиме безпосереднє відношення до визначення пріоритетності об'єктів ППО в районі операцій. Ці “ключові фактори” (критерії), як правило, пов'язані з ідентифікованими (вказаними або неявними) “неприйнятними умовами” в операційному середовищі [10-13].

На першому етапі група протиповітряної та протиракетної оборони повітряного компоненту в тісній координації з усіма іншими силами ППО (морський та наземний компонент) приймає безпосередню участь в плануванні протиповітряних операцій, зокрема щодо розробки плану протиповітряної оборони (Air Defence Plan – ADP). Цей план буде спрямований на підтримку загального плану кампанії, а також покликаний координувати спільні зусилля при виконанні завдань ППО та ефективно використовувати обмежені ресурси ППО. Це особливо стосується планування ППО в операціях, оскільки кількість засобів придатних до здійснення ППО, дуже обмежена, а успішні удари противника балістичними ракетами можуть мати великий політичний та психологічний вплив [14].

Застосування сил та засобів ППО наземного та морського базування (Surface-Based Air Defence – SBAD) та ПРО (Theatre Ballistic Missile Defence – TBMD) планується і виконується через об'єднаний список пріоритетних об'єктів, що підлягають прикриттю (Joint Prioritised Defended Assets And Areas List – JPDAAL) [14].

На початку процесу воєнно-політичне керівництво (наприклад, North Atlantic Council – NAC) надає керівні вказівки (директиви та розпорядження) щодо особливо важливих об'єктів (HVA – High Value Asset) на основі визначених ризиків та політичних міркувань шляхом визначення списку критичних об'єктів країни (Political CAL – Critical Assets List). Тоді, на основі застосування CVRT-методу оцінювання та визначення важливості критичних об'єктів (критичність, вразливість, відновлюваність та рівень загрози) кожен з командувачів компонентів об'єднаних сил розробляє свій список критичних пріоритетних об'єктів (Critical Assets List). Хоча цей процес є ітеративним, робоча група з питань визначення об'єднаних об'єктів/активів, що

підлягають прикриттю (Defended Assets Working Group – JDAWG), несе відповідальність від імені командувача об'єднаних сил за завершення розроблення проекту об'єднаний список пріоритетних об'єктів, що підлягають прикриттю (JPDAAL). Ця група (JDAWG) усуває дублювання та, якщо це можливо, об'єднує об'єкти/активи, які знаходяться в безпосередній близькості один від одного. Результатом цієї діяльності буде єдиний перелік цивільних та військових особливо важливих об'єктів з визначеними пріоритетами для здійснення їх прикриття, – об'єднаний список пріоритетних критичних об'єктів/активів (Joint Prioritized Critical Assets List – JPCAL) [14].

Розроблений об'єднаний список пріоритетних критичних об'єктів (JPCAL), разом із початковим проектом плану здійснення ППО та ПРО, буде представлений командувачу об'єднаних сил в ході проведення брифінгу (JCB). Після схвалення командувачем, цей список буде відправлений через Верховного головнокомандувача ОЗС НАТО в Європі (Supreme Allied Commander Europe – SACEUR) та військовий комітет НАТО (Military Committee – MC) до Північноатлантичної Ради (North Atlantic Council – NAC) для остаточного затвердження. Після схвалення Радою (NAC) цей список стане об'єднаним списком пріоритетних об'єктів, що підлягають прикриттю (JPDAL), та буде відправлений назад до командувача об'єднаних сил і далі до JDAWG, яка, у свою чергу, надсилає його командувачу ППО (Air Defence Commander – ADC) та посадовим особам, що відповідають за планування ППО та ПРО для розробки об'єднаного плану ППО в операції (ADP). Цей план буде опублікований в якості Додатку до об'єднаного координаційного наказу (Joint Coordination Order – JCO). Через необхідність підтримання оперативної гнучкості в ході будь-якої операції НАТО реагування на кризу процес визначення JPCAL/JPDAL повинен бути динамічним [14].

Для планування ПРО, відповідні країни та командувачі компонентів надають свої списки важливих пріоритетних об'єктів/активів та районів (Prioritized Critical Assets And Areas List – PCAAL) до Верховного штабу ОЗС НАТО в Європі (Supreme Headquarters Allied Powers Europe – SHAPE), який у відповідності до політичних керівних вказівок, об'єднує ці списки в об'єднаний список пріоритетних критичних об'єктів та районів (Joint Prioritised Critical Assets And Areas List – JPCAAL). Виходячи з наявних засобів (загроз) ракетного нападу, JPCAAL трансформується повітряним командуванням (Air Command – AIRCOM) в початковий проект плану ПРО з об'єднаний список пріоритетних критичних об'єктів та районів, що підлягають прикриттю (Joint Prioritised Defended Assets And Areas List – JPDAAL). JPDAAL має бути затверджений Північноатлантичною Радою. Після схвалення, план ПРО передається в підрозділи протиракетної оборони [14].

ведення в оману, мобільність та розосередження. Наприклад, літаки знаходяться на аеродромі в спеціальних укриттях, розосередженні, розгорнуті макети літаків.

Наступним ключовим елементом, для визначення пріоритетності об'єкту ППО є їх відновлюваність – характеристика об'єкту, яка визначає наскільки швидко може бути відновлено функціонал об'єкту у випадку його ураження.

Відновлюваність (Recoverability) – цей критерій характеризує фактор часу та потрібних ресурсів для його відновлення. Під час оцінювання аналізуються ступінь та здатність об'єкту до відновлення. Наприклад, для цивільного об'єкту (ГЕС) у разі його ураження, час та ресурси мають значно більшу вагу у порівнянні з ураженням елементу аеродрому (наприклад, злітно-посадкової

смуги) який можна відновити впродовж доби.

Наступним ключовим елементом, для визначення пріоритетності об'єкту ППО є загроза – характеристика об'єкту, яка визначає яка ймовірність того, що об'єкт буде обраним противником для нанесення удару по ньому.

Загроза (Threat) – цей критерій вказує на ймовірність того, що об'єкт стане об'єктом спостереження або ураження зі сторони противника. Аналізуються такі фактори як наміри противника та бойові можливості його вогневих (ракетних та авіаційних) засобів. Наприклад, літаки на аеродромі мають високу ймовірність, що по ним буде завданий удар.

Числові значення критеріїв оцінювання критичних об'єктів з метою визначення їх пріоритетності наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Ранжування критеріїв пріоритетності критичних об'єктів

Бали	Критерій			
	C (критичність)	V (вразливість)	R (відновлюваність)	T (загроза)
1 (1-2)	ураження критичного об'єкту не впливає на досягнення мети операції (місії)	критичний об'єкт важковразливий (міцний) та розосереджений	тривалість відновлення ураженого критичного об'єкту не впливає на досягнення мети операції (місії) (до 12 годин)	дуже низька ймовірність, що по об'єкту буде нанесений удар противником ($P_y=0,1\div 0,2$)
2 (3-4)	може призвести до затримки досягнення мети операції (місії)	об'єкт важковразливий (міцний), але легко виявляється засобами розвідки	може призвести до затримки досягнення мети операції (місії) (до 1 доби)	низька ймовірність удару, ($P_y=0,3\div 0,4$)
3 (5-6)	може не дати досягти мети операції (місії)	об'єкт розосереджений, або замаскований (прихований), але легко виявляється засобами розвідки	може не дати досягти мети операції (місії) (до 3 діб і більше)	середня ймовірність удару, ($P_y=0,5\div 0,7$)
4 (7-8)		об'єкт легко виявляється засобами розвідки		висока ймовірність удару, ($P_y=0,8\div 0,9$)
5 (9-10)				дуже висока ймовірність удару, ($P_y>0,9$)

Загальна процедура застосування описаного методу може бути умовно розбита на декілька кроків (рис. 1). Основою для цього процесу на першому кроці є складання обґрунтованого загального списку об'єктів. Група об'єктів повинна визначатися з урахуванням процедур категоризації, які регламентуються діючим законодавством.

Таблиця 2

Формування списку критичних об'єктів (CAL)

INDEX	Priority	NATO ID	Description	POL / MIL	Location (coordinates)		Diameter (km)
					B	L	
1
...
n

Крок 1. Складаються списки критичних об'єктів (CAL), як цивільних, так і військових (рис. 1 п.п. 1, 2). Список розробляється в табличній формі (табл. 2) де для кожного об'єкту вказується його категорія пріоритету/важливості

(незмінна величина, яка визначає до якої категорії критичних /важливих об'єктів держави він відноситься), місце розташування (координати) зі стислим описом об'єкту та його розміри (діаметр).

В таблиці 2:

INDEX – номер за порядком (після ранжування визначає важливість об'єкту в JP CAL);

Priority – пріоритетність (категорія/група пріоритетності/важливості)

NATO ID – умовний буквено-числовий код об'єкту в загальній системі кодування об'єктів;

Description – назва (стилий опис) об'єкту;

POL/MIL – ознака належності об'єкту (P – політичний (political)/цивільний); M – військовий (military);

Location (coordinates) – геодезичні координати об'єкту (B – широта, L – довгота);

Diameter – розмір об'єкту (діаметр кола, що описує його зовнішні межі), кілометри (NM).

Крок 2. Складається загальний об'єднаний список критичних об'єктів (JPCAL) з урахуванням ризиків та політичних міркувань шляхом визначення списку критичних об'єктів (табл. 3).

Кожна компонента (повітряна, наземна, морська, сили спеціальних операцій) розробляє свій список пріоритетних критичних об'єктів на основі застосування CVRT-методу.

В таблиці 3:

C – числове значення показника критичності (Criticality);

V – числове значення показника вразливості (Vulnerability);

R – числове значення показника відновлюваності (Recoverability);

T – числове значення показника загрози (Threat).

Final Score – сума числових значень усіх чотирьох показників для кожного i -го об'єкту

$$\text{Final Score}_i = \sum_{j=1}^4 i$$

Таблиця 3

Формування об'єднаного списку пріоритетних критичних об'єктів (JP CAL)

INDEX	Priority	NATO ID	Description	POL / MIL	Location (coordinates)		Diameter (km)	C	V	R	T	Final Score
					B	L						
1
...
n

Числові значення, які можуть набути показники CVRT-методу, та критерії їх оцінювання наведено в табл. 1.

Після завершення оцінювання усіх n визначених в об'єднаному списку критичних об'єктів здійснюється ранжування списку за максимумом суми числових значень їх показників

$$\{1, \dots, i, \dots, n\} \rightarrow \max(\text{Final Score}_i), \dots, \min(\text{Final Score}_i)$$

Слід зазначити, що якість результату застосування CVRT-методу як процедури оцінювання та визначення пріоритетності критичних об'єктів, все ж є суб'єктивною і значною мірою залежить від компетентності членів робочої групи (JDAWG). За досвідом, для виконання цього завдання, як найкраще підходить метод мозкового штурму.

У випадку значної кількості об'єктів та з метою уникнення випадків отримання однакових значень загальних сум для різних об'єктів доцільно використовувати 10-бальну шкалу оцінювання (табл. 1). Як що й у цьому випадку “рівноважливості” критичних об'єктів уникнути не вдалося, слід повторного застосувати CVRT-метод для окремого оцінювання таких об'єктів.

Крок 3. Об'єднаний список критичних об'єктів (JP CAL) надається командувачу повітряного компоненту (рис. 1 п. 3) з метою формування проекту об'єднаного списку пріоритетних об'єктів, що підлягають прикриттю (JPDAAL). Результатом формування цього списку є

визначення варіанту розподілу доступних підрозділів (засобів) ППО та ПРО для прикриття критичних об'єктів з урахуванням їх важливості, можливих загроз (ракетних та авіаційних ударів противника) та спроможностей наявних сил та засобів ППО компонентів. Розподіл здійснюється згідно затвердженого об'єднаного списку критичних об'єктів (JP CAL) починаючи з початку списку – об'єкту з найвищим рівнем пріоритету. При цьому враховують бойові можливості підрозділів (засобів) ППО та ПРО щодо знищення конкретних ЗПН та прикриття визначеної зони (площі, діаметру) критичного об'єкту. Обраний варіант стає початковим проектом плану ППО, який буде представлений командувачем в ході проведення брифінгу (рис. 1 п. 4). Після затвердження цей список стане об'єднаним списком пріоритетних об'єктів, що підлягають прикриттю (JPDAAL) і буде наданий посадовим особам, які відповідають за планування ППО в операції (рис. 1 п. 5).

Перевагами застосування CVRT-методу у процесі планування операцій є адаптивність, гнучкість та точність.

Адаптивність: Метод дозволяє швидко реагувати на зміни в обстановці, що є критично важливим у сучасних бойових умовах.

Гнучкість: CVRT-метод забезпечує гнучкість у реагуванні на різноманітні загрози, що дозволяє військовим структурам адаптувати свої дії відповідно до динамічних змін на полі бою. Це особливо важливо в умовах сучасних бойових дій, де ситуація може змінюватися швидко.

Точність: Використання математичних моделей підвищує точність оцінювання загроз і дозволяє уникнути суб'єктивності в прийнятті рішень, що зменшує ризик помилок під час виконання бойових завдань. Це є критично важливим для успішного виконання місій.

Стандарти НАТО: CVRT-метод відповідає міжнародним стандартам, що полегшує інтеграцію з союзниками під час підготовки та проведення об'єднаних багатонаціональних операцій.

Таким чином, CVRT-метод є важливим інструментом для підвищення ефективності протиповітряної оборони, дозволяючи військовим структурам адаптувати свої дії відповідно до динамічних змін операційного середовища.

Вплив на ефективність протиповітряної оборони:

1. Підвищення оперативної готовності.

Застосування CVRT-методу дозволяє органам військового управління швидко реагувати на загрози, що підвищує загальну оперативну готовність. Це особливо важливо в умовах, де ситуація може динамічно змінюватися і потребувати миттєвої реакції в реальному часі, і кожна секунда може мати вирішальне значення.

2. Поліпшення взаємодії між підрозділами.

Завдяки мережевій архітектурі, CVRT-метод покращує взаємодію між різними підрозділами протиповітряної оборони. Це дозволяє створити більш злагоджену систему, здатну ефективно

реагувати на загрози з повітря, зменшуючи ризик помилок через недостатню комунікацію.

3. Оптимізація ресурсів.

Метод дозволяє оптимізувати використання ресурсів, що є важливим аспектом у військовій справі. Завдяки точним оцінкам і швидким рішенням, військові можуть більш ефективно розподіляти свої сили та засоби, зменшуючи витрати та підвищуючи результативність.

4. Підтримка прийняття рішень.

Застосування CVRT-методу надає військовим командирам детальну інформацію для прийняття рішень, що підвищує їхню впевненість у виборі тактики та стратегії.

Виклики впровадження методу CVRT:

1. Складність інтеграції.

Впровадження CVRT-методу може стикатися з труднощами інтеграції в існуючій системі управління. Це вимагає значних зусиль для навчання персоналу та адаптації технічних засобів.

2. Витрати на технології.

Впровадження нових технологій та методів аналізу може вимагати значних ресурсних витрат, в тому числі і фінансових. Це може бути проблемою для країн з обмеженими ресурсами.

3. Залежність від даних.

Ефективність CVRT-методу значною мірою залежить від якості та актуальності даних, що використовуються для оцінки загроз. Неправильні або застарілі дані можуть призвести до помилок у прийнятті рішень.

Обговорення

Визначення важливості об'єктів ППО підкреслює кілька ключових аспектів, які стосуються їх ролі в національній безпеці України.

1. Об'єкти ППО є частиною критичної інфраструктури, їх важливість визначається на основі потенційних наслідків порушення функціонування. Це включає ризики для економічної, енергетичної та обороноздатності держави.

2. Використання CVRT-методу сприяє оптимальному розподілу обмежених ресурсів, що є критично важливими для ефективного функціонування системи ППО в умовах обмежених можливостей та ресурсів.

3. Визначення важливості об'єктів ППО включає процедури категоризації, які регламентуються законодавством. Це забезпечує системний підхід до захисту об'єктів критичної інфраструктури.

4. Використання CVRT-методу для оцінювання ефективності вже впроваджених заходів безпеки дозволяє виявити слабкі місця у системі та розробити рекомендації для їх усунення.

Таким чином, обговорення статті підкреслює, що порядок визначення важливості об'єктів ППО є критично важливим для забезпечення національної безпеки.

Висновки

Важливі державні об'єкти та об'єкти критичної інфраструктури є невід'ємною частиною

національної безпеки, оскільки вони забезпечують функціонування військово-промислового комплексу, економіки, комунікацій тощо та відіграють ключову роль у забезпеченні обороноздатності держави, особливо в умовах триваючої російсько-української війни.

Водночас слід відзначити, що існують критерії для визначення рівня негативного впливу на об'єкти критичної інфраструктури. Це дозволяє більш точно оцінювати важливість об'єктів залежно від їх функцій і важливості для суспільства.

Категоризація об'єктів критичної інфраструктури – це динамічний процес, який потребує постійного моніторингу та оновлення. Зміни в технологіях, загрозах та пріоритетах безпеки вимагають регулярного перегляду критеріїв оцінки важливості об'єктів. Ефективний захист об'єктів без тісної співпраці між суб'єктами сектору безпеки та оборони, які управляють більшістю об'єктів. Обмін інформацією, розроблення спільних планів реагування на кризи є ключовим чинником.

За даних умов, визначення важливості об'єктів ППО є комплексним завданням, яке вимагає системного підходу та постійного вдосконалення. Від ефективності цього процесу залежить національна безпека та стійкість оборони держави.

Список використаних джерел

1. Горбенко В.М. Запобігання можливій ескалації в повітряному домені збройної боротьби / Горбенко В.М., Коршець О.А. // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень. – 2023. – № 3(79). – С. 52-60.

2. Теоретико-прикладні аспекти російсько-української війни: гібридна агресія та національна стійкість: монографія / колектив авторів; за заг. ред. М. В. Ковалю. – К.: НУОУ, 2023. – 316 с.

3. Volodymyr Horbenko. Strategic Air Operation as one of the possible instruments in a hybrid war between the Russian Federation against Ukraine / Volodymyr Horbenko, Olena Korshets // Journal of Scientific Papers "Social development & Security". – 2022. – Vol.12, No.2. – С. 14 – 30.

4. Дроздов С.С., Тюрін В.В., Коршець О.А., Горбенко В.М. Аналіз операційного середовища та ймовірні сценарії застосування Повітряних Сил Збройних Сил України. К.: Наука і оборона, № 3, 2019 р. – С. 25-30.

5. Valius Venckunas, Eight Lessons Air Forces are Learning from the War in Ukraine, Aerotime Hub, 8 January 2023. Accessed at: Eight military aviation lessons from the war in Ukraine – AeroTime (Required Reading).

6. Досвід застосування Повітряних Сил Збройних Сил України в російсько-українській війні 2023 року, навчальний посібник / колектив авторів. – К.: НУОУ. – 290 с.

7. Наказ № 23 від 15.01.2021 про затвердження Методичних рекомендацій щодо категоризації об'єктів критичної інфраструктури. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://zakonjonline.com.ua/documents/show/4999955>.

8. Єрменчук О.П. Методики категоризації об'єктів критичної інфраструктури [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://er.dduvs.in.ua/bitsream/123476>.

9. Доктрина з протиповітряної оборони (затверджена НГШ ЗС України 16.11.2020 року). – 33 с.

10. AJP-3.3. Allied joint doctrine for Air and Space Operations. 24 p. Accessed at: https://www.smdc.army.mil/Portals/38/Documents/Publications/Publications/SMDC_0120_AMD-BOOK_Finalv2.pdf
11. ATP-82 Allied Doctrine for Ground-Based Air Defence. 14. JFAC Estimate. Functional Planning Guide. NATO Air Operations Center of Excellence. – v.8 Nov. 2021. – 138 p.
12. Joint Publication 3-01 Countering Air and Missile Threats.
13. Air and Missile Defense Vision 2028. March 2019. –

Volodymyr Horbenko (PhD of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-7030-0995>

Volodymyr Kireienko (PhD of Military Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-0230-9450>

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

METHOD OF DETERMINING THE IMPORTANCE OF AIR DEFENSE OBJECTS IN THE OPERATIONS PLANNING PROCESS USING THE METHOD OF FACTOR ANALYSIS

The article discusses the method of determining the importance of air defense objects using the method of factor analysis, namely the CVRT method. The experience of conducting air defense of Ukraine since the beginning of the large-scale invasion of the Russian Federation shows trends in constantly changing the tactics of the enemy's air attack means, shifting the emphasis of its missile and air strikes on various groups of important state and military objects, critical infrastructure objects and even on civilian population. This shows that the importance of critical objects, as a complex indicator, cannot be a constant value that was determined even before the start of the war. Its meaning should be adaptive to the realities of the changing, predictable and constantly changing situation, and have a clear and understandable mechanism for its calculation. This should ensure the absence of bias and subjectivity in decision-making and become a necessary condition for high-quality air defense planning and evaluation of its effectiveness in operations.

The work reveals the main provisions regarding the content of the procedures for determining the importance of critical objects using the CVRT method adopted in the process of planning the operations of the armed forces of NATO countries. The purpose, tasks, and proposals for the distribution of air defense forces and means have been determined, taking into account the factors that obtained during the assessment of the importance of critical objects.

The key indicators that determine the importance of critical objects, their characteristics and evaluation criteria are considered. An analysis of the application of the CVRT method to determine the importance of critical objects in the process of planning operations according to NATO standards carried out.

Keywords: object importance, effectiveness, assessment, air defense, operations planning process, factor analysis, CVRT-method.

References

1. Horbenko V.M. Zapobihannia mozhlyvii eskalatsii v povitrianiomu domeni zbroinoi borotby / Horbenko V.M., Korshets O.A. // Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen. – 2023. – № 3(79). – S. 52-60.
2. Teoretyko-prykladni aspekty rosiisko-ukrainskoi viiny: hibrydna ahresia ta natsionalna stiikist: monohrafiia / kolektyv avtoriv; za zah. red. M. V. Kovalia. –K.: NUOU, 2023. –316 s.
3. Volodymyr Horbenko. Strategic Air Operation as one of the possible instruments in a hybrid war between the Russian Federation against Ukraine / Volodymyr Horbenko, Olena Korshets // Journal of Scientific Papers “Social development & Security”. – 2022. – Vol.12, No.2. – C. 14 – 30.
4. Drozdov S.S., Tiurin V.V., Korshets O.A., Horbenko V.M. Analiz operatsiinoho seredovyscha ta ymovirni stsennarii zastosuvannia Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. K.: Nauka i oborona, № 3, 2019 r. – S. 25-30.
5. Valius Venckunas, Eight Lessons Air Forces are Learning from the War in Ukraine, AeroTime Hub, 8 January 2023. Accessed at: Eight military aviation lessons from the war in Ukraine – AeroTime (Required Reading).
6. Dosvid zastosuvannia Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy v rosiisko-ukrainskii viini 2023 roku, navchalnyi posibnyk / kolektyv avtoriv. – K.: NUOU. – 290 s.
7. Nakaz № 23 vid 15.01.2021 pro zatverdzhennia Metodychnykh rekomendatsii shchodo katehoryzatsii ob'ektiv krytychnoi infrastruktury. [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: <https://zakonjline.com.ua/documents/show/4999955>.
8. Yermenchuk O.P. Metodyky katehoryzatsii ob'ektiv krytychnoi infrastruktury [Elektronnyi resurs] Rezhym dostupu: <http://er.dduvs.in.ua/bitstream/123476>.
9. Doktryna z protypovitrianoi oborony (zatverdzhena NShS ZS Ukrainy 16.11.2020 roku). – 33 s.
10. AJP-3.3. Allied joint doctrine for Air and Space Operations.
11. ATP-82 Allied Doctrine for Ground-Based Air Defence.
12. Joint Publication 3-01 Countering Air and Missile Threats.
13. Air and Missile Defense Vision 2028. March 2019. – 24 p. Accessed at: https://www.smdc.army.mil/Portals/38/Documents/Publications/Publications/SMDC_0120_AMD-BOOK_Finalv2.pdf
14. JFAC Estimate. Functional Planning Guide. NATO Air Operations Center of Excellence. – v.8 Nov. 2021. – 138 p.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-43-49

УДК 519.872

Чернега Володимир Миколайович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-6209-8136>

Гудима Олег Петрович (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0001-5150-6683>

Плахотний Володимир Миколайович

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

Плахотна Марія Миколаївна

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЇ ПРОТИДІЇ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТАМ

У статті представлено математичну модель (ММ) комплексної протидії безпілотним літальним апаратам (БпЛА) на основі теорії марковських процесів. Модель побудована з використанням моделі масового обслуговування з різнорідними каналами обслуговування, що відображає різноманітність засобів виявлення та ураження БпЛА. Процес протидії БпЛА розглядається як система, що складається з двох підсистем: підсистеми виявлення та підсистеми ураження. Для підсистеми виявлення розглянуто 6 каналів обслуговування, що відповідають різним засобам виявлення БпЛА (радіотехнічний, радіолокаційний, оптико-електронний, акустичний, тепловізійний та візуальне спостереження). Для підсистеми ураження розглянуто 4 канали обслуговування, що відповідають різним засобам ураження БпЛА (радіоелектронна боротьба, бойова лазерна система, надпотужне НВЧ-випромінювання та вогневе ураження). Для кожної підсистеми побудовано граф станів та записано системи диференціальних рівнянь, що описують перехід системи між цими станами. Отримано вирази для ймовірностей перебування системи у відповідних станах у сталому (стаціонарному) режимі. На основі цих ймовірностей визначено основні характеристики системи комплексної протидії БпЛА, такі як математичне сподівання виявлення/ураження БпЛА окремими каналами та всіма каналами, ймовірності виявлення/ураження БпЛА окремими каналами. Розроблена математична модель дає змогу обґрунтувати вимоги до системи комплексної протидії БпЛА та її складових.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, математична модель, комплексна протидія, теорія марковських процесів, модель масового обслуговування, виявлення безпілотних літальних апаратів, ураження безпілотних літальних апаратів.

Вступ

Досвід застосування з'єднань (частин, підрозділів) Збройних Сил України в бойових діях показав, що проблема протидії безпілотним літальним апаратам (БпЛА) з кожним часом набуває все більшої актуальності. Крім того, якщо порівняти досвід протидії БпЛА, набутий у 2014-2022 роках, з досвідом 2022-2024 років, то чітко проглядається необхідність розроблення способів та засобів комплексної протидії БпЛА [1, 8-11].

На даний час існують різні способи та засоби протидії БпЛА. Наприклад, засоби радіотехнічної або радіолокаційної розвідки, засоби акустичної розвідки, радіоелектронної боротьби та оптико-електронного впливу тощо [2].

Разом з тим, адекватної математичної моделі, яка б давала можливість врахувати комплексний характер протидії БпЛА, на даний час не розроблено.

Аналіз наукових праць [3-6], присвячених проблемним питанням протидії БпЛА, свідчить про те, що на даний час розроблені та застосовуються математичні моделі, які описують

окремі способи протидії БпЛА. При цьому, відсутні наукові праці з розроблення математичного апарату для описання комплексної протидії БпЛА з використанням різнорідних засобів протидії.

Матеріали та методи

У даному дослідженні застосовується теорія масового обслуговування для розроблення математичної моделі комплексної протидії БпЛА.

Результати

Процес протидії БпЛА складається з двох етапів – виявлення та ураження. Так, на етапі виявлення можуть застосовуватися засоби радіотехнічної та радіолокаційної розвідки, оптико-електронні, акустичні, тепловізійні засоби виявлення БпЛА та візуального спостереження тощо, а на етапі ураження – станції радіоелектронної боротьби, бойові лазерні системи, системи надпотужного височастотного випромінювання (НВЧ-випромінювання), вогневі засоби тощо.

З переліку засобів виявлення та ураження

Для моделі ураження БПЛА розглянемо наступні стани (рис. 2):

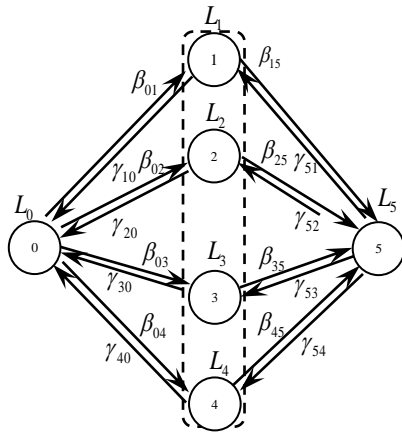


Рисунок 2. Граф станів системи ураження БПЛА

V_0 – рішення на ураження БПЛА не прийнято;
 V_1 – БПЛА уражається 1-м каналом;

V_2 – БПЛА уражається 2-м каналом;
... ..
 V_4 – БПЛА уражається 4-м каналом;
 V_5 – всі БПЛА уражаються всіма каналами.

Аналогічно, на основі графу станів системи ураження БПЛА можна записати наступну систему диференціальних рівнянь (3):

де L_0, \dots, L_5 – ймовірності перебування системи у станах V_0, \dots, V_5 відповідно;

$\beta_{01}, \dots, \beta_{04}$ – інтенсивності переходу системи зі стану V_0 у стани V_1, \dots, V_4 відповідно;

$\beta_{15}, \dots, \beta_{45}$ – інтенсивності переходу системи зі станів V_1, \dots, V_4 у стани V_5 відповідно;

$\gamma_{51}, \dots, \gamma_{54}$ – інтенсивності переходу системи зі стану V_5 у стани V_1, \dots, V_4 відповідно;

за початкових умов:
$$L_0(0) = 1, L_1(0) = L_2(0) = \dots = L_5(0) = 0$$

та умов нормування:

$$\sum_i L_i = 1, i = \overline{0,5} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{dL_0}{dt} = -(\beta_{01} + \beta_{02} + \beta_{03} + \beta_{04})L_0 + \gamma_{10}L_1 + \gamma_{20}L_2 + \gamma_{30}L_3 + \gamma_{40}L_4; \\ \frac{dL_1}{dt} = -(\beta_{15} + \gamma_{10})L_1 + \beta_{01}L_0 + \gamma_{51}L_5; \\ \frac{dL_2}{dt} = -(\beta_{25} + \gamma_{20})L_2 + \beta_{02}L_0 + \gamma_{52}L_5; \\ \dots \dots \\ \frac{dL_4}{dt} = -(\beta_{45} + \gamma_{40})L_4 + \beta_{04}L_0 + \gamma_{54}L_5; \\ \frac{dL_5}{dt} = -(\gamma_{51} + \gamma_{52} + \gamma_{53} + \gamma_{54})L_5 + \beta_{15}L_1 + \beta_{25}L_2 + \beta_{35}L_3 + \beta_{45}L_4. \end{cases} \quad (3)$$

З точки зору виявлення БПЛА, інтенсивності переходу системи зі стану A_0 у стани A_1, \dots, A_6 це інтенсивності появи БПЛА в зонах виявлення відповідних засобів. Тому можна вважати, що ці інтенсивності однакові, тобто:

$$\lambda_{01} = \lambda_{02} = \dots = \lambda_{06} = \lambda_0. \quad (5)$$

Ймовірності знаходження системи у станах A_1, \dots, A_6 характеризують ймовірність того, що БПЛА виявляються відповідними засобами виявлення. Тобто:

P_1 – ймовірність того, що БПЛА виявляється радіотехнічним засобом;

P_2 – ймовірність того, що БПЛА виявляється радіолокаційним засобом;

P_3 – ймовірність того, що БПЛА виявляється оптико-електронним засобом;

P_4 – ймовірність того, що БПЛА виявляється акустичним засобом;

P_5 – ймовірність того, що БПЛА виявляється тепловізійним засобом;

P_6 – ймовірність того, що БПЛА виявляється постом візуального спостереження;

Те ж саме стосується й інтенсивностей переходу зі стану V_0 в стани V_1, \dots, V_4 та з цих станів у стан V_5 . Тобто:

$$\beta_{01} = \beta_{02} = \dots = \beta_{04} = \lambda_0. \quad (6)$$

При цьому, інтенсивності переходу зі станів A_1, \dots, A_6 у стан A_0 та зі стану A_7 у стан A_1, \dots, A_6 є інтенсивностями обслуговування каналу виявлення БПЛА. Тому можна записати, що:

$$\begin{aligned} \mu_{10} = \mu_{71} = \mu_1; \quad \mu_{20} = \mu_{72} = \mu_2; \\ \mu_{30} = \mu_{73} = \mu_3; \quad \mu_{40} = \mu_{74} = \mu_4; \quad \mu_{50} = \mu_{75} = \mu_5; \quad (7) \\ \mu_{60} = \mu_{76} = \mu_6. \end{aligned}$$

Так само можемо записати і для інтенсивності переходу зі станів V_1, \dots, V_4 у стан V_0 та зі стану V_5 у стан V_1, \dots, V_4 . Тобто:

$$\begin{aligned} \gamma_{10} = \gamma_{51} = \gamma_1; \quad \gamma_{20} = \gamma_{52} = \gamma_2; \\ \gamma_{30} = \gamma_{53} = \gamma_3; \quad \gamma_{40} = \gamma_{54} = \gamma_4. \end{aligned} \quad (8)$$

Для визначених припущень (5)-(8) графі станів систем виявлення та ураження БПЛА можуть бути

спрощені.

відповідно.

Модифіковані графи станів систем виявлення та ураження БПЛА наведено на рис. 3 та 4

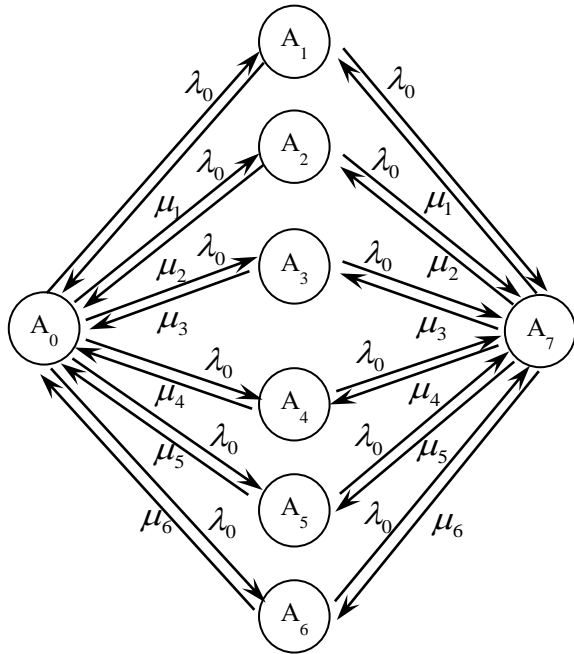


Рисунок 3. Модифікований граф станів системи виявлення БПЛА

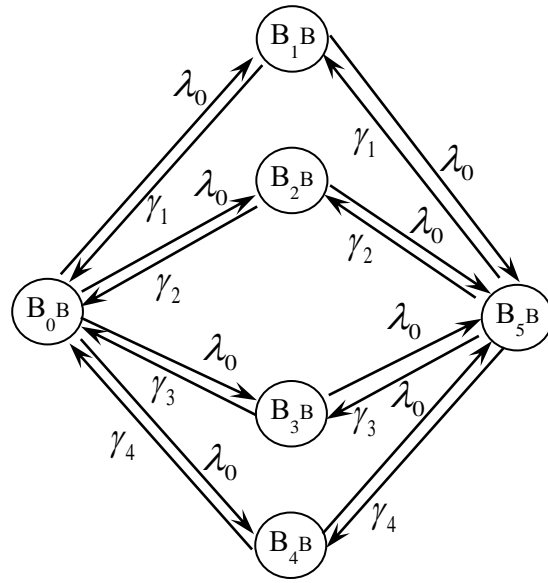


Рисунок 4. Модифікований граф станів системи ураження БПЛА

При цьому система диференціальних рівнянь моделі виявлення (9) та для моделі ураження (10): також спрощується та має наступний вигляд, для

моделі виявлення (9) та для моделі ураження (10):

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -6\lambda_0 P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \mu_3 P_3 + \mu_4 P_4 + \mu_5 P_5 + \mu_6 P_6 \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda_0 P_0 + \mu_1 P_7 - (\mu_1 + \lambda_0) P_1 \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_0 P_0 + \mu_2 P_7 - (\mu_2 + \lambda_0) P_2 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dP_6}{dt} = \lambda_0 P_0 + \mu_6 P_7 - (\mu_6 + \lambda_0) P_6 \\ \frac{dP_7}{dt} = -(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_6) P_7 + \lambda_0 (P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_6) + \lambda_0 L_0 - \lambda_0 P_7 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{dL_0}{dt} = -4\lambda_0 L_0 + \gamma_1 L_1 + \gamma_2 L_2 + \gamma_3 L_3 + \gamma_4 L_4 \\ \frac{dL_1}{dt} = -(\lambda_0 + \gamma_1) L_1 + \lambda_0 L_0 + \gamma_1 L_5 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dL_4}{dt} = -(\lambda_0 + \gamma_4) L_4 + \lambda_0 L_0 + \gamma_4 L_5 \\ \frac{dL_5}{dt} = -(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4) L_5 + \lambda_0 (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \end{cases} \quad (10)$$

Можна показати, що для n засобів виявлення рішеннями систему диференціальних рівнянь (9) у сталому режимі будуть наступні вирази:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^*}{n - \sum_{i=1}^n \alpha_i^*} P_{n+1} \text{ та}$$

$$P_i = \left[1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \alpha_i^* \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^*}{n - \sum_{i=1}^n \alpha_i^*} + \sum_{i=1}^n \alpha_i^* \right]^{-1},$$

де $\alpha_i = \frac{\lambda_0}{\mu_i}$ та $\alpha_i^* = \frac{1}{1 + \alpha_i}$,

а для m засобів ураження рішеннями системи диференціальних рівнянь (10) у сталому режимі будуть наступні вирази:

$$L_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \phi_i^*}{m - \sum_{i=1}^m \phi_i^*} L_{m+1} \text{ та}$$

$$L_m = \left[1 + \sum_{i=1}^n \phi_i \phi_i^* \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i^*}{n - \sum_{i=1}^n \phi_i^*} + \sum_{i=1}^n \phi_i^* \right]^{-1},$$

де $\phi_i = \frac{\lambda_0}{\gamma_i}$ та $\phi_i^* = \frac{1}{1 + \phi_i}$.

Основні характеристики системи комплексної протидії БПЛА можуть бути визначені наступним чином:

математичне сподівання виявлення БПЛА n -им каналом виявлення матиме наступний вигляд:

$$M_{0n} = \mu_n (P_n + P_{n+1}) = \lambda_0 P_{Bn};$$

математичне сподівання M_Σ кількості БПЛА, які виявляються всіма каналами в одиницю часу дорівнює:

$$M_\Sigma = \sum_{i=1}^n M_{0i} = \lambda_0 \sum_{i=1}^n P_{Bi} = \lambda_0 P_B,$$

де $P_B = \sum_{i=1}^n P_{Bi}$;

ймовірності виявлення БПЛА n -тим каналом:

$$P_B = \left[\sum_{i=1}^n \mu_i \left(\alpha_i \alpha_i^* \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^*}{n - \sum_{i=1}^n \alpha_i^*} + \alpha_i^* \right) + \sum_{i=1}^n \mu_i \right]^{-1}$$

$$\cdot \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^*}{n - \sum_{i=1}^n \alpha_i^*} + \sum_{i=1}^n \alpha_i^* \right]^{-1};$$

математичне сподівання ураження БПЛА m -тим каналом ураження:

$$B_{0m} = \beta_m (L_m + L_{m+1}) = \beta_0 L_{\gamma m};$$

математичне сподівання B_Σ числа БПЛА, які уражено всіма каналами в одиницю часу дорівнює:

$$B_\Sigma = \sum_{i=1}^m B_{0i} = \beta_0 \sum_{i=1}^m L_{\gamma i} = \beta_0 L_{\gamma},$$

де $L_B = \sum_{i=1}^m L_{\gamma i}$;

ймовірності ураження БПЛА m -тим каналом ураження:

$$L_{\gamma} = \left[\sum_{i=1}^m \beta_i \left(\phi_i \phi_i^* \frac{\sum_{i=1}^m \phi_i^*}{m - \sum_{i=1}^m \phi_i^*} + \phi_i^* \right) + \sum_{i=1}^m \beta_i \right]^{-1}$$

$$\cdot \left[1 + \sum_{i=1}^m \phi_i \phi_i^* \frac{\sum_{i=1}^m \phi_i^*}{m - \sum_{i=1}^m \phi_i^*} + \sum_{i=1}^m \phi_i^* \right]^{-1}.$$

Обговорення

Таким чином, розроблена математична модель комплексної протидії БПЛА дає можливість змоделювати процеси виявлення та ураження БПЛА враховуючи різноманітність каналів їх обслуговування, а також знайти аналітичні залежності для ймовірностей перебування системи у відповідних станах у сталому (стаціонарному) режимі. На основі цих ймовірностей можна визначити основні характеристики системи комплексної протидії БПЛА, такі як математичне сподівання виявлення/ураження БПЛА окремими каналами та всіма каналами, ймовірності виявлення/ураження БПЛА окремими каналами.

Висновки

Отже, зазначена модель дає можливість обґрунтувати вимоги до системи комплексної протидії БПЛА та її складових.

Перспективами подальших досліджень є розрахунки ефективності комплексної протидії БПЛА:

- ефективність комплексного виявлення БПЛА;
- ефективність комплексного ураження БПЛА.

Для їх визначення необхідно зв'язати параметри математичних моделей з тактико-технічними характеристиками конкретних засобів виявлення та ураження БПЛА, що й буде напрямом подальшого дослідження.

Список використаних джерел

1. Корсунов С. І., Волков А. Ф., Оборонов М. І., Орехов С. В., Гуртовенко В. В., Федченко С. І. Трансформація завдань безпілотної авіації: від створення до застосування у воєнних конфліктах сучасності. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 3(44). С. 66-81. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.08>.
2. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденцій розвитку засобів протиповітряної оборони): монографія / І.С. Романченко, О.М. Загорка, С.Г. Бутенко, О.В. Дейнега. – Житомир: «Полісся». 2011. – 344 с.

3. Городнов В.П., Дробаха Г.А., Єрмошин М.О., Смірнов Є.Б., Ткаченко В.І. Моделирование бойових дій військ (сил) протиповітряної оборони та інформаційне забезпечення процесів управління ними (теорія, практика, історія розвитку). Харків: ХВУ, 2004. 409 с.

4. Городнов В.П. Моделирование боевых действий частей, соединений и объединений Войск ПВО. Харків: ВИРТА ППО, 1987. 380 с.

5. Ярош С. П., Гур'єв Д. О. Аналіз розвитку безпілотних літальних апаратів, способів їх бойового застосування та розробка пропозицій щодо організації ефективної боротьби з безпіотною авіацією. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2(43). С. 54–60. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.07>.

6. Прикладные модели теории массового обслуживания / В.А. Шуенкин, В.С. Донченко. В помощь студентам специальности «Прикладная математика»: Учебное пособие. Київ. НМК ВО, 1992. 398 с.

7. Інформаційно-аналітичні матеріали. Звіт №24. Уроки російсько-української війни 2022 року: Воєнні аспекти. Аналіз досвіду застосування безпілотних літальних апаратів іранського виробництва у російсько-українській війні та рекомендації щодо боротьби з ними. ЦНДІ ЗС України. Київ, 2022. 37 с.

8. Висновки та уроки застосування безпілотних авіаційних комплексів Збройними Силами України, а також агресором: монографія / Гусак Ю. А., Потьомкін М. М., Шовкошитний І. І., Мовчан А. С., Гразіон Д. І. Київ: ЦНДІ ЗС України, 2022. 48 с.

9. Ярош С. П., Гур'єв Д. О. Обґрунтування можливості застосування сучасного, удосконаленого та перспективного озброєння для боротьби з безпілотними літальними апаратами в угрупованні зенітних ракетних військ. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 3(44). С. 88–100. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.10>.

10. Волков А. Ф., Лезік О. В., Корсунов С. І., Левагін Г. А., Яновський О. В., Івахненко К. В. Аналіз застосування БПЛА у вірмено-азербайджанському воєнному конфлікті та можливі шляхи боротьби з ними. Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 4(64). С. 7–17. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.01>.

11. Бараш Ю. Безпілотна орда: організація формувань БпЛА в армії Росії нині і в перспективі. Defense Express. 2021: веб-сайт. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/bezpilotna_orda_organizatsija_formuvan_bp_la_v_armiji_rossiji_nini_i_v_perspektivi-2863.html (дата звернення: 01.11.2022).

Volodymyr Cherniha (PhD of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-6209-8136>

Oleh Hudyma (PhD of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0001-5150-6683>

Volodymyr Plahotnyi

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

Mariia Plahotna

<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX COUNTER-DEFENSE AGAINST UNMANNED AIRCRAFT

The article presents a mathematical model (MM) for integrated counteraction against unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the theory of Markov processes. The model is constructed using a queuing model with heterogeneous service channels, reflecting the variety of means for detecting and neutralizing UAVs. The UAV counteraction process is considered as a system comprising two subsystems: the detection subsystem and the neutralization subsystem. For the detection subsystem, six service channels corresponding to different means of UAV detection are considered (radio engineering, radar, optoelectronic, acoustic, thermal imaging, and visual observation). For the neutralization subsystem, four service channels are considered, representing different means of UAV neutralization (electronic warfare, combat laser systems, high-power microwave radiation, and kinetic neutralization). For each subsystem, a state graph is constructed, and systems of differential equations describing the transition of the system between these states are formulated. Expressions for the steady-state (stationary) probabilities of the system being in specific states are derived. Based on these probabilities, the main characteristics of the integrated UAV counteraction system are determined, such as the mathematical expectation of UAV detection/neutralization by individual channels and all channels combined, as well as the probabilities of UAV detection/neutralization by individual channels. The developed mathematical model enables the justification of requirements for the integrated UAV counteraction system and its components.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, mathematical model, integrated counteraction, Markov process theory, queuing model, UAV detection, UAV neutralization.*

References

1. Korsunov, S. I., Volkov, A. F., Oboronov, M. I., Orekhov, S. V., Gurtovenko, V. V., & Fedchenko, S. I. Transformation of UAV Tasks: From Development to Application in Modern Military Conflicts. Science and Technology of the Air Force of Ukraine, 2021, No. 3(44), pp. 66–81. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.08>.

2. Romanchenko, I. S., Zahorka, O. M., Butenko, S. G., & Deinega, O. V. Theory and Practice of Combatting Small Low-Flying Targets (Evaluation of Capabilities and Development Trends in Air Defense Systems): Monograph. Zhytomyr: Polissya, 2011. 344 p.

3. Gorodnov, V. P., Drobakha, G. A., Yermoshyn, M. O., Smirnov, Ye. B., & Tkachenko, V. I. Modeling Combat

- Operations of Air Defense Forces and Information Support for Their Management Processes (Theory, Practice, History of Development). Kharkiv: KHU, 2004. 409 p.
4. Gorodnov, V. P. Modeling Combat Operations of Air Defense Units, Subunits, and Formations. Kharkiv: VIRT PVO, 1987. 380 p.
5. Yarosh, S. P., & Huriev, D. O. Analysis of UAV Development, Combat Application Methods, and Proposals for Effective Countermeasures Against UAVs. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2021, No. 2(43), pp. 54–60. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.43.07>.
6. Shuenkin, V. A., & Donchenko, V. S. Applied Models of Queuing Theory. Kyiv: NMK VO, 1992. 398 p.
7. Informational-Analytical Materials. Report No. 24. Lessons of the Russian-Ukrainian War 2022: Military Aspects. Analysis of the Use of Iranian UAVs in the Russian-Ukrainian War and Recommendations for Countering Them. CNDI AFU, Kyiv, 2022. 37 p.
8. Husak, Yu. A., Potomkin, M. M., Shovkoshytnyi, I. I., Movchan, A. S., & Grazion, D. I. Conclusions and Lessons from the Use of UAV Complexes by the Armed Forces of Ukraine and the Aggressor: Monograph. Kyiv: CNDI AFU, 2022. 48 p.
9. Yarosh, S. P., & Huriev, D. O. Substantiation of the Use of Modern, Improved, and Promising Weapons for Countering UAVs in Air Defense Missile Groupings. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2021, No. 3(44), pp. 88–100. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.10>.
10. Volkov, A. F., Lezik, O. V., Korsunov, S. I., Levahin, H. A., Yanovsky, O. V., & Ivakhnenko, K. V. Analysis of UAV Use in the Armenia-Azerbaijan Conflict and Possible Countermeasures. *Armament and Military Equipment Systems*, 2020, No. 4(64), pp. 7–17. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.64.01>.
11. Barash, Yu. Drone Horde: Organization of UAV Formations in the Russian Army Today and in the Future. *Defense Express*, 2021: website. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/bezpilotna_orde_organizatsija_fo_rmuvan_bpla_v_armiji_rosiji_nini_i_v_perspektivi-2863.html (accessed: 01.11.2022).

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

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-50-54

УДК 623.746.8

Печененко Олег Михайлович

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

Ярошенко Ярослав Віталійович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

Блискун Олександр Євгенович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-7751-8313>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ З УРАХУВАННЯМ ЗАСТОСУВАННЯ FPV-ДРОНІВ-ПЕРЕХОПЛЮВАЧІВ

У статті розглядаються новітні підходи до інтеграції FPV-дронів-перехоплювачів до системи протиповітряної оборони, як окремої підсистеми, особливо в контексті сучасної війни, яка вимагає високої оперативності реагування на загрози з повітря та високої ефективності їх ураження. Проблема підвищення оперативної готовності та точності дій винищувальної авіації стає особливо актуальною в сучасних умовах ведення бойових дій, де час реакції на загрозу визначає успішність виконання завдання. За останні роки застосування FPV-дронів, які можуть перехоплювати ворожі безпілотні літальні апарати революціонізувало підхід до протидії загрозам у повітрі. У статті розглянуто спосіб підвищення ефективності протиповітряної оборони шляхом спільного застосування FPV-дронів і винищувальної авіації, що дозволяє суттєво підвищити швидкість реагування на загрози та підвищити ефективність ураження повітряних цілей. Результати досліджень показують, що інтеграція дронів-перехоплювачів у систему протиповітряної оборони дозволяє суттєво знизити час реакції, підвищує ефективність ураження цілей та оптимізує розподіл ресурсів. Стаття може бути корисною для фахівців з військових технологій, дослідників у сфері протиповітряної оборони та операторів безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: *винищувально-авіаційне прикриття, протиповітряна оборона, безпілотний авіаційний комплекс, безпілотний літальний апарат, FPV-дрон-перехоплювач, інтеграція, ефективність, аналіз, винищувальна авіація.*

Вступ

У сучасних війнах все частіше з'являються нові загрози з повітря, зокрема безпілотні авіаційні комплекси (БпАК), здатні виконувати як розвідувальні, так і бойові завдання. FPV-дрони-перехоплювачі з кожним днем стають важливою складовою протиповітряної оборони, оскільки їх висока маневреність і здатність оперативно реагувати на загрози забезпечують швидке знищення ворожих розвідувальних БпАК і значно знижують ризик ураження для об'єктів критичної інфраструктури [1, 2].

Оперативність реагування на загрози з повітря та ефективність застосування засобів прикриття є основними критеріями оцінки сучасних систем протиповітряної оборони, особливо у зв'язку з новими викликами у вигляді малопомітних, низькошвидкісних дронів, що можуть нести потенційну загрозу військовим об'єктам і цивільній

інфраструктурі. FPV-дрони-перехоплювачі в поєднанні з пілотованою авіацією можуть значно підвищити оперативність реагування та ефективність знищення таких загроз.

Розвиток FPV-технологій в Україні є вагомим кроком у напрямку створення ефективних оборонних засобів. Наприклад, українські розробники впровадили велику кількість інновацій для підвищення точності дронів-перехоплювачів, а досвід російсько-української війни демонструє їх ефективність у захисті від розвідувальних та розвідувально-ударних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [3-13]. У роботах [14-17] розглянуті існуючі методики оцінювання ефективності системи протиповітряної оборони (ППО), але вони не враховують сучасні реалії російсько-української війни та вплив FPV-дронів-перехоплювачів на ефективність ППО. Тому, виникає необхідність в розробленні загальних підходів оцінювання ефективності системи протиповітряної оборони з

урахованням застосування FPV-дронів-перехоплювачів.

Метою статті розроблені загальні підходи щодо оцінювання ефективності системи протиповітряної оборони з урахуванням застосування FPV-дронів-перехоплювачів.

Матеріали та методи

У статті використовувались загальнонаукові методи дослідження, такі як: аналіз, синтез та математичне моделювання. Для визначення впливу дронів-перехоплювачів на загальну ефективність протиповітряної оборони (ППО) використовувалися польотні характеристики та статистичні дані щодо знищення цілей у повітрі [5, 6].

Результати

Зазвичай ефективність системи ППО оцінюється за показником математичного сподівання кількості уражених засобів повітряного нападу (ЗПН) противника системою ППО сил оборони України (СОУ), $M_{ц}^{ППО}$. Оскільки, основними складовими системи ППО є угруповання зенітних ракетних військ та винищувальної авіації, то ефективність системи ППО можна розрахувати наступним чином [15].

$$M_{ц}^{ППО} = M_{ц}^{ВА} + M_{ц}^{ЗРВ}, \quad (1)$$

де $M_{ц}^{ВА}$ – математичне сподівання кількості уражених ЗПН противника винищувальною авіацією;

$M_{ц}^{ЗРВ}$ – математичне сподівання кількості уражених ЗПН противника угрупованням ЗРВ Повітряних Сил (ПС) та військ ППО Сухопутних військ (СВ).

З появою FPV-дронів-перехоплювачів завдання щодо перехоплення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) противника поступово перейшли від винищувальної авіації до них. Тому, виникає необхідність в удосконаленні наявного науково-методичного апарату оцінювання ефективності системи ППО та введення нового показника за яким можна адекватно провести оцінювання його ефективності, а саме показника математичного сподівання кількості уражених ЗПН противника за допомогою БпЛА (FPV-дронами-перехоплювачами). Відповідно показник математичного сподівання кількості уражених ЗПН противника системою ППО СОУ матиме наступний вигляд:

$$M_{ц}^{ППО} = M_{ц}^{ВА} + M_{ц}^{ЗРВ} + M_{ц}^{БпЛА}, \quad (2)$$

де $M_{ц}^{БпЛА}$ – математичне сподівання кількості уражених ЗПН противника БпЛА (FPV-дронами-перехоплювачами).

Ефективність системи протиповітряної оборони при цьому буде розраховуватись відношенням

$$E_{ВА,ЗРВ,БпЛА}^{ППО} = \frac{M_{ц}^{ППО}}{N_{ц}}, \quad (3)$$

де $N_{ц}$ – загальна кількість ЗПН в ударі.

Загальна кількість ЗПН в ударі $N_{ц}$ розраховується за формулою

$$N_{ц} = \sum_{j=1}^J N_j, \quad (4)$$

де N_j – кількість ЗПН j -го типу в ударі;
 j – кількість типів ЗПН.

Кількість ЗПН N_j визнається відповідно до їх розподілу в ударі (для прикладу у масованому нальоті можуть застосовуватися: 18 літаків різних типів (ударні, РЕБ, винищувачі); 15 ударних БпЛА типу “Shahed-136”; 35 крилатих або балістичних ракет).

Для кожної підсистеми, яка здійснює відбиття масованого удару розраховується частка ЗПН від їх загальної кількості в ударі, по яких діють свої ЗРВ ($\gamma_{ЗРВ}$), ВА ($\gamma_{ВА}$) та БпЛА ($\gamma_{БпЛА}$).

$$\gamma_{ЗРВ} + \gamma_{ВА} + \gamma_{БпЛА} = \gamma_{ЗРВ,ВА,БпЛА} = 1 \quad (5)$$

Частка ЗПН від їх загальної кількості в ударі, по яких діють свої ЗРВ, ВА, БпЛА відповідно розраховується за формулою

$$\gamma_{ЗРВ,ВА,БпЛА} = \frac{N_{ц}^{ЗРВ,ВА,БпЛА}}{N_{ц}} \quad (6)$$

Розподіл зусиль здійснює командувач повітряного командування (угруповання Повітряних Сил) [18].

Відповідно до експоненційного закону розподілу ймовірностей математичне сподівання кількості уражених ЗПН противника безпілотними літальними апаратами розраховується за формулою [14]:

$$M_{ц}^{БпЛА} = N_{ц}^{БпЛА} \cdot \left(1 - \left(1 - W_{ц} \right)^{\frac{N_{БпЛА}}{N_{ц}^{БпЛА}}} \right), \quad (7)$$

де $W_{ц}$ – середня ймовірність ураження цілі одним своїм безпілотним літальним апаратом;

$N_{БпЛА}$ – кількість своїх безпілотних літальних апаратів;

$N_{ц}^{БпЛА}$ – кількість ЗПН, по яких діють свої безпілотні літальні апарати.

Запропонований підхід враховує ймовірність невиявлення частини засобів повітряного нападу противника через технічні або оперативні обмеження. Цей фактор враховується за допомогою коефіцієнта ефективності системи розвідки повітряного противника $k_{еф}^{СРПП}$, який коригує кількість ЗПН у розрахунках. Такий підхід забезпечує адекватну оцінку необхідних сил і засобів для відбиття повітряного нападу, включаючи резерв FPV-дронів-перехоплювачів.

Кількість ЗПН, по яких діють свої БпЛА, розраховується за формулою:

$$N_{\text{ц}}^{\text{БпЛА}} = N_{\text{ц}} \cdot k_{\text{еф}}^{\text{СРПП}} \cdot \gamma_{\text{БпЛА}}, \quad (8)$$

де $N_{\text{ц}}$ – загальна кількість ЗПН в ударі;
 $k_{\text{еф}}^{\text{СРПП}}$ – коефіцієнт ефективності системи розвідки повітряного противника.

Кількість безпілотних літальних апаратів, які беруть участь у відбитті повітряного удару, розраховується за формулою:

$$N_{\text{в}} = k_{\text{н}} \sum_{f=1}^m N_{\text{в}f0}, \quad (9)$$

де $N_{\text{в}f0}$ – кількість безпілотних літальних апаратів на f -му аеродромі (майданчику);
 m – кількість аеродромів (майданчиків) безпілотних літальних апаратів, які залучаються для виконання завдань в системі ППО;
 $k_{\text{н}}$ – значення бойового напруження операторів безпілотних літальних апаратів.

Наведений підхід враховує математичне сподівання кількості знищених ЗПН підрозділами ЗРВ, ВА та БпЛА та коефіцієнт участі цих підрозділів у відбитті масованого удару відповідно до прийнятого рішення щодо розподілу зусиль командувачем (ПвК, угруповання ПС).

Обговорення

FPV-дрони здатні ефективно нейтралізувати невеликі БпЛА, що використовуються для розвідки та вогневого ураження [7, 13].

Використання FPV-дронів для перехоплення дозволяє спрямувати пілотовану авіацію та зенітні ракетні війська на більш складні цілі (крилаті ракети, балістичні ракети, пілотована авіація противника), що дозволить не витратити дороговартісні авіаційні та зенітні керовані ракети по БпЛА, які можуть коштувати вдсятеро менше. Це не лише економить ресурси, але й зменшує ризик для життя льотного складу. Завдяки інтеграції з сучасними системами управління FPV-дрони можуть автоматично реагувати на загрози, координуючи свої дії з пілотованими літаками та підрозділами ЗРВ, що підвищує загальну ефективність системи протиповітряної оборони [8, 14].

Виявлені переваги впровадження FPV-дронів у систему протиповітряної оборони особливо актуальні в умовах сучасної війни. Дрони-перехоплювачі демонструють високу ефективність у захисті від ворожих БпЛА, оскільки здатні оперативніше реагувати на загрози у радіусі своєї дії. В Україні вже використовуються такі дрони для захисту від “Shahed-136” та інших ворожих апаратів, що допомагає доволі ефективно усувати загрози без ризику для життя людей [9, 10].

FPV-дрони-перехоплювачі також забезпечують важливу перевагу в плані витрат на експлуатацію, оскільки їх вартість і витрати на обслуговування значно нижчі, ніж у пілотованої авіації. Це дозволяє

використовувати їх у більшій кількості, охоплюючи більші території й забезпечуючи надійне повітряне прикриття. Наприклад, дрони українського виробництва з успіхом перехоплюють і нейтралізують як розвідувальні, так і ударні БпЛА противника, демонструючи свою перевагу над аналогічними іноземними зразками [11].

Висновки

У статті розроблено загальні підходи щодо оцінювання ефективності системи ППО, які, на відміну від існуючих, враховують частковий показник математичного сподівання кількості уражених засобів повітряного нападу противника БпЛА. Представлений підхід дозволяє провести комплексне оцінювання ефективності системи ППО. Важливим аспектом є врахування ймовірності невиявлення частини засобів повітряного нападу противника через технічні або оперативні обмеження. Цей фактор відображено через коефіцієнт ефективності системи розвідки повітряного противника $k_{\text{еф}}^{\text{СРПП}}$, що забезпечує реалістичність оцінок і можливість адекватного планування резерву FPV-дронів-перехоплювачів для протидії всім потенційним загрозам.

Інтеграція FPV-дронів-перехоплювачів у систему ППО відкриває нові можливості для захисту від загроз з повітря. Висока маневреність і швидкість реагування FPV-дронів роблять їх особливо корисними в сучасних бойових умовах, де швидкість реакції є ключовим фактором. Впровадження таких технологій у систему ППО дозволяє оптимізувати витрати, знизити ризик для льотного складу та підвищити ефективність ураження повітряних цілей. Дослідження показало, що завдяки комбінованому використанню FPV-дронів, винищувальної авіації та зенітних ракетних військ можна створити надійну й економічно ефективну систему ППО для захисту стратегічно важливих об'єктів.

У подальшому доцільно на основі загальних підходів, розроблених у роботі, удосконалити методики оцінювання ефективності системи ППО, які будуть використовуватись в органах військового управління та військових частинах Повітряних Сил Збройних Сил України та підрозділах протиповітряної оборони інших складових СОУ.

Список використаних джерел

1. Черниш, О. “Дрони-дракони і перехоплювачі. Чи справді українці здійснили революцію в БпЛА”. ВВС, 2024. Доступно на: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cy9e90rv280o>.
2. Як Україна дає відсіч путінським безпілотникам-розвідникам. TSN, 2024. Доступно на: <https://tsn.ua/zbroya/yak-ukrayina-daye-vidsich-putinskim-bezpilotnikam-rozvidnikam-the-times-2674491.html>.
3. Тартачний, О. “Дрони, що збивають дрони: як працюють БпЛА-перехоплювачі”. Speka, 2024. Доступно на: <https://speka.media/droni-shho-zbivayut-droni-yak-pracuuyut-perexoplyuvaci-bpla-pn0r47>.
4. Залата, О. “Зброя проти “Шахедів”, розвідників і гелікоптерів: як в Україні створюють супердрони”. Focus, 2024. Доступно на: <https://focus.ua/uk/digital/662142-fpv-droni-v-ukrajini-yak-perehoplyuyut-bpla-i-gelikopteri>.
5. Моллой, О. “Як дрони змінюють сучасну війну?”

- Друкарня, 2024. Доступно на: <https://drukarnia.com.ua/articles/fpv-droni-v-rol-i-perekhoplyuvachiv-stattya-10-84IdB>.
6. VANGUARD Українська мілітарі-спільнота. “FPV-дрони в ролі перехоплювачів”. Мілітарний, 2024. Доступно на: <https://mil.in.ua/uk/articles/yak-drony-zminuyut-suchasnu-vijnu/>.
7. Johnson, A., Lee, P. “Interception Drones in Modern Air Defense”. *Journal of Defense Studies*, 19(3), 2022. DOI: 10.1016/j.jds.2022.03.007.
8. Smith, R. “FPV Drones for Rapid Response in Aerial Combat”. *Air Warfare Journal*, 17(2), 2022. DOI: 10.1111/awj.172.2022.04.
9. Ivanenko, O. “Problemy integracii FPV dronivz aviacijnymu systemamy”. *Aerokosmichna bezpeka Ukrainy*, 2023. Dostupno na: <https://www.aerosafety.ua/>.
10. Chen, Y., Zhang, L. “FPV Drone Strategies in Modern Warfare”. *International Journal of Aerial Defense*, 2023. DOI: 10.1016/ijad.2023.04.008.
11. Dmytrenko, P. M. “Integracija bezpilotnykh aparativ v oboronni systemy Ukrainy”. *Visnyk nacional'noji bezpeky*, #3, 2022.
12. Ritu Sharma, At Par With US Gray Eagles! China's Combat Fleet Of Wing Loong UAVs To Become 'Smarter, Deadlier' With AI. Доступно на: <https://www.eurasiantimes.com/uavs-get-ai-boost-plaaf-aims-to-bring-wing/>
13. Кондратенко, І. М. “Застосування FPV дронів у системах протиповітряної оборони”. *Вісник повітряних сил України*, №4, 2023. Доступно на: <http://www.hups.mil.gov.ua/>
14. Збірник тактичних розрахунків з прикладами : навч. посіб. / колектив авторів. – К. : НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2018. – 96 с.
15. Ткаченко В.І., Смірнов С.Б. “Критерійна оцінка ефективності протиповітряної оборони держави”. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, випуск 3(32), 2012, Харків. Доступно на: [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92\\$#gsc.tab=0](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92$#gsc.tab=0)
16. Новіченко С.В., Довгалюк Д.С., Кривчун В.І. “Оцінка математичного сподівання кількості знищених засобів повітряного нападу угрупованням зенітних ракетних військ з урахуванням складу повітряного удару по об'єкту прикриття” *Системи обробки інформації*, випуск 1 (172) , 2023, Харків, DOI: 10.30748/soi.2023.172.06
17. Горбачов К.М. “Часткова методика оцінювання ефективності забезпечення бойових дій підрозділів протиповітряної оборони військових формувань тактичного рівня засобами ураження”, *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил* 4(70), 2021, Харків, DOI: 10.30748/zhups.2021.70.02.
18. Б. Шкурат і Д. Резнік, *Експрес-оцінювання варіантів організації взаємодії засобів протиповітряної оборони з літальними апаратами*, *Повітряна міць України*, т. 1, вип. 6, с. 105–111, Чер 2024. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-105-111>.

Oleh Pechenko

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

Yaroslav Yaroshenko (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-8651-4920>

Oleksandr Blyskun (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-7751-8313>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

GENERAL APPROACHES TO ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF AIR DEFENSE WITH THE INTEGRATION OF FPV INTERCEPTOR DRONES

This article examines innovative approaches to the integration of FPV (First-Person View) interceptor drones into air defense systems as a distinct subsystem, particularly in the context of modern warfare that demands rapid response to aerial threats and high target engagement efficiency. The challenge of enhancing the operational readiness and precision of fighter aviation is especially relevant in contemporary combat scenarios, where reaction time is critical to mission success. In recent years, the use of FPV drones capable of intercepting enemy unmanned aerial vehicles (UAVs) has revolutionized approaches to countering airborne threats. The article explores methods for improving air defense effectiveness through the combined use of FPV drones and fighter aviation, enabling significantly faster threat response and higher target engagement efficiency. The research findings demonstrate that integrating interceptor drones into air defense systems significantly reduces reaction time, increases the efficiency of neutralizing threats, and optimizes resource allocation. The study's conclusions can benefit military technology experts, air defense researchers, and UAV operators by providing insights into these advanced technologies and their application in modern air combat scenarios.

Keywords: air cover, air defense, unmanned aviation system, unmanned aerial vehicle, FPV interceptor drone; integration, efficiency, analysis, fighter aviation.

References

1. Chernysh, O. “Drony-drakony i perekhoplyuvachi. Chy spravdi ukrajinci zdijnsly revoljuciju v BpLA”. *BBC*, 2024. Dostupno na: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cy9e90rv280e>.

2. Jak Ukraïna daje vidsich putinskym bezpilotnykam-rozvidnykam. TSN, 2024. Dostupno na: <https://tsn.ua/zbroja/yak-ukrayina-daye-vidsich-putinskim-bezpilotnykam-rozvidnykam-the-times-2674491.html>.
3. Tartachnyj, O. "Drony, shho zbyvajutj drony: jak pracjujutj BpLA-perekhoplyuvachi". Speka, 2024. Dostupno na: <https://speka.media/droni-shho-zbivayut-droni-yak-pracyuyut-perekhoplyuvaci-bpla-pn0r47>.
4. Zalata, O. "Zbroja proty "Shakhediv", rozvidnykiv i ghelikopteriv: jak v Ukraïni stvorjujutj superdrony". Focus, 2024. Dostupno na: <https://focus.ua/uk/digital/662142-fpv-droni-v-ukrajini-yak-perehoplyuyut-bpla-i-gelikopteri>.
5. Molloy, O. "Jak drony zminjujutj suchasnu vijnu?" Drukarnja, 2024. Dostupno na: <https://drukarnia.com.ua/articles/fpv-droni-v-rol-i-perekhoplyuvachiv-stattya-10-84IdB>.
6. VANGUARD Ukraïnsjka militari-spiljnota. "FPV-drony v roli perekhoplyuvachiv". Militarnyj, 2024. Dostupno na: <https://mil.in.ua/uk/articles/yak-drony-zminyuyut-suchasnu-vijnu/>.
7. Johnson, A., Lee, P. "Interception Drones in Modern Air Defense". Journal of Defense Studies, 19(3), 2022. DOI: 10.1016/j.jds.2022.03.007.
8. Smith, R. "FPV Drones for Rapid Response in Aerial Combat". Air Warfare Journal, 17(2), 2022. DOI: <https://10.1111/awj.172.2022.04>.
9. Ivanenko, O. "Problems of integration of FPV drones with aviation systems." Aerospace safety of Ukraine, 2023. Available at: <https://www.aerosafety.ua/>.
10. Chen, Y., Zhang, L. "FPV Drone Strategies in Modern Warfare". International Journal of Aerial Defense, 2023. DOI: 10.1016/ijad.2023.04.008.
11. Dmytrenko, P. M. "Integration of unmanned aerial vehicles into the defense systems of Ukraine." Bulletin of National Security, No. 3, 2022.
12. Ritu Sharma, At Par With US Gray Eagles! China's Combat Fleet Of Wing Loong UAVs To Become Smarter, Deadlier With AI, Access <https://www.eurasiantimes.com/uavs-get-ai-boost-plaaf-aims-to-bring-wing>.
13. Kondratenko, I. M. "Zastosuvannya FPV dronivu systemakh protypovitrjanoji oborony". Visnyk povitryjnykh syl Ukraïny, #4, 2023. Dostupno na: <http://www.hups.mil.gov.ua/>
14. Zbirnyk taktychnykh rozrakhunkiv z prykladamy : navch. posib. / kolektyv avtoriv. – K. : NUOU im. Ivana Chernjakhivskogho, 2018. – 96 s.
15. Tkachenko V.I., Smirnov Je.B. "Kryterijna ocinka efektyvnosti protypovitrjanoji oborony derzhavy". Zbirnyk naukovykh pracj Kharkivskogho universytetu Povitryjnykh Syl, vypusk 3(32),2012, Kharkiv. Dostupno na: [http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92\\$#gsc.tab=0](http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%92$#gsc.tab=0)
16. Novichenko S.V., Dovghaljuk D.S., Kryvchun V.I. "Ocinka matematychnogho spodivannja kiljkosti znyshhenykh zasobiv povitryjanogho napadu ughrupovannjam zenitnykh raketnykh vijsjk z urakhuvannjam skladu povitryjanogho udaru po ob'jektu prykyttja" Systemy obrobky informaciji, vypusk 1 (172) , 2023, Kharkiv, DOI: 10.30748/soi.2023.172.06
17. Ghorbachov K.M. "Chastkova metodyka ocinjuvannya efektyvnosti zabezpechennja bojovykh dij pidrozdiliv protypovitrjanoji oborony vijsjkovykh formuvanj taktychnogho rivnja zasobamy urazhennja", Zbirnyk naukovykh pracj Kharkivskogho nacionaljnogho universytetu Povitryjnykh Syl 4(70), 2021, Kharkiv, DOI: 10.30748/zhups.2021.70.02.
18. B. Shkurat i D. Rjeznik, Ekspres-ocinjuvannya variantiv orghanizaciji vzajemodiji zasobiv protypovitrjanoji oborony z litaljnymy aparatamy, Povitryjana micj Ukraïny, t. 1, vyp. 6, s. 105–111, Cher 2024. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-105-111>.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-55-60

УДК 378.004

¹Махно Євгеній Петрович (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0001-9743-1082>

¹Руденко Євген Григорович (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0003-3093-8780>

¹Шапран Олександр Олександрович (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0002-7093-5608>

²Артюшин Леонід Михайлович (доктор технічних наук, професор)
<https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

ПАРАДИГМА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ АДМІНІСТРУВАННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Впровадження штучного інтелекту в дистанційне навчання стимулювало розвиток нових напрямків у галузі освіти, значно розширивши можливості автоматизації та інтелектуалізації освітніх процесів. Це зробило навчання більш персоналізованим і адаптивним. Проте потенціал дистанційного навчання в нашій країні ще не повністю розкрито. Дослідження спрямоване на вивчення нових напрямків розвитку дистанційного навчання через інтелектуалізацію процесів адміністрування. Це дасть можливість підняти дистанційне навчання на новий рівень, особливо в контексті нових завдань. Окрім того, саме адміністрування дистанційного навчання потребує трансформації та розширення відповідно до нових можливостей, вимог та складних процесів. У роботі використано методи системного аналізу, синтезу та формалізації.

У статті розглянуто функції, принципи роботи та взаємодію з іншими системами загальної концепції системи. У процесі формування концептуальної моделі було враховано аналіз вимог користувачів, який дозволив визначити потреби користувачів та вимоги до системи. Для зручності розуміння структури системи було розроблено схему, яка детально описує взаємозв'язки між її елементами. Крім того, були визначені типи даних, вимоги до них та їх взаємозв'язки в системі. В результаті розробки концептуальної моделі було прогнозовано широкий спектр нових можливостей щодо вирішення задач інтелектуалізації освітнього процесу системи дистанційного навчання, що дозволить підвищити ефективність навчання. Стаття буде корисною для розробників освітніх систем, адміністраторів дистанційного навчання та дослідників у галузі освітніх технологій, оскільки надає детальний опис концептуальної моделі та рекомендації щодо її впровадження.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуалізація, автоматизація, система дистанційного навчання, концептуальна модель, адміністрування.

Вступ

Зі стрімким розвитком дистанційного навчання в Україні значно розширився спектр завдань та напрямків управління освітнім процесом. Це викликало потребу в нових можливостях автоматизації та інтелектуалізації адміністративних процесів за допомогою технологій штучного інтелекту (AI).

Впровадження технологій штучного інтелекту в освітній процес (AIED) у дистанційному навчанні відкрило нові горизонти для застосування інноваційних методів навчання. Однак, існуюча система адміністрування дистанційного навчання не здатна повністю реалізувати ці можливості. Тому виникає необхідність дослідження щодо інтеграції новітніх технологій в адміністративні процеси. Також актуальною є проблема трансформації системи адміністрування відповідно до нових завдань та створення концептуальної моделі

інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання.

Основною метою адміністративно-управлінської діяльності у дистанційному навчанні є покращення освітнього процесу. Для цього необхідно досліджувати попередні роботи у двох напрямках: автоматизація та інтелектуалізація систем управління, а також розробка експертно-навчальних систем.

Останні роки характеризуються швидким обміном інформацією між користувачами, що стимулює зусилля з автоматизації та інтелектуалізації дистанційних освітніх процесів. Для цього використовуються програми для проведення конференцій, брифінгів та створення платформ для забезпечення освітнього процесу. Крім того, поширення систем дистанційного навчання через мобільний зв'язок стало новим кроком у популяризації серед користувачів.

Під час проведення досліджень було проведено аналіз інформаційного забезпечення інформаційно-освітнього середовища, необхідного для дистанційного навчання (далі-ДН) в Збройних Силах України, а також проаналізовано етапи впровадження системи дистанційного навчання (далі-СДН) в освітню сферу [1].

У дослідженні [2] було висвітлено процес інтелектуалізації управління освітньою системою та призначення керівництва освітніми та науковими органами України як пріоритетної роботи з метою усунення існуючих проблем в цій сфері. Дослідники аргументують необхідність трансформації існуючої системи освіти та науки шляхом інтелектуалізації управління та визначають умови її функціонування. Для досягнення цієї мети була запропонована концепція інтелектокористування, яка включає у себе управлінські технології інтеграції автоматизованих процесів та алгоритми, що мотивують інтелектуальні здібності людей. У закладах освіти вже було успішно застосовано інструменти інтелектуалізованого менеджменту, такі як синтелектика, синергізація і синархія, які дали позитивні результати.

У роботі [3] була проведена дослідження з автоматизації навчання та контролю знань у вищих навчальних закладах за допомогою інформаційних технологій. Була розроблена математична модель інформаційного середовища, що складається з двох компонентів: інформаційного середовища системи управління навчанням та інформаційного середовища системи управління вищим навчальним закладом. Визначено складові елементи системи управління навчанням та визначені три рівні представлення інформації: інформаційні середовища системи управління освітнім процесом, процеси та суб'єкти навчання. З метою оптимальної взаємодії у інформаційному просторі, що має три рівні управління освітнім процесом, була створена математична модель. Для автоматизованого контролю знань, супроводу навчального процесу та зберігання інформаційного ресурсу була розроблена нова структура. Також було розроблено новий метод для виділення освітніх об'єктів у системі управління та автоматизації наповнення їх поточною освітньою інформацією в процесі навчання.

Для автоматизації управління освітнім процесом була створена нова інформаційна технологія [4]. Для організації існуючих освітніх інформаційних засобів, які базуються на логіко-математичних моделях, були розроблені нові методи, які збільшують ефективність циклічних процесів. Ці методи дозволяють розв'язувати задачі оцінювання системи освіти та забезпечують автоматизоване управління освітнім процесом в навчальних закладах.

Для автоматичного аналізу освітнього процесу були розроблені нові аналітичні методи, які ґрунтуються на логічних та математичних процедурах, що використовуються в інформаційних технологіях для створення систем автоматизованого управління освітнім процесом. Ці методи

дозволяють оцінювати якість надання освітніх послуг на різних етапах функціонування процесу навчання, а не тільки під час екзаменаційних сесій.

Також були розроблені методи, що здатні аналізувати непередбачувані події, які виникають у процесі навчання, на основі ланцюгів скінченних графів та дерев рішень. Ці методи стали базою для вибору стратегій у подібних процесах. Запропоновано новий метод організації взаємодії користувачів в межах локальної інформаційної мережі автоматизованої системи управління освітнім процесом з метою підвищення ефективності управління. Для контролю процесу навчання розроблено інтелектуальні тести та логічні класифікатори знань. Ці методи дозволяють формувати та реалізовувати управляючі дії, щоб забезпечити заданий алгоритм функціонування складових освітнього процесу.

У дослідженні [5] описано можливості використання дистанційного навчання як критично важливого інструменту для підтримки боєготовності Збройних Сил України. Оглянуті цифрові освітні платформи, які забезпечують доступ до освіти та навчання в будь-якому місці та в будь-який час, дозволяють оперативно адаптуватися до нових викликів і вимог. В сучасному непередбачуваному середовищі військовослужбовці повинні мати ряд компетентностей, зокрема, цифрову та компетентність у галузі даних. Суттєвими аспектами військової освіти є широке застосування сучасних технологій навчання та використання прогресивних методів.

У роботі [6] була запропонована нова інформаційна технологія для створення освітнього середовища в системах дистанційного навчання. Ця технологія ґрунтується на використанні модульної структури інструментів та враховує індивідуальні потреби та особливості учасників дистанційного навчання. В результаті такого підходу до навчання можливо підвищити ефективність процесів формування та експертної оцінки якості знань.

Дослідження, щодо створення експертно-навчальних систем (ЕНС) теж мають свої здобутки. У роботі [7] спроектована ЕНС для студентів вищих навчальних закладів технічних спеціальностей. Її складовими є п'ять підсистем: 1) підсистема набування знань про об'єкти предметної області та розв'язання завдань (задач); 2) підсистема цілей і змісту фахової підготовки; 3) підсистема стратегій і технологій навчання; 4) підсистема діагностування знань і вмінь студента; 5) підсистема інтелектуального інтерфейсу та моделі студента.

Авторами роботи [8] розроблено й обґрунтовано модель використання відкритих електронних науково-освітніх систем для розвитку інформаційно-дослідницької компетентності наукових та науково-педагогічних працівників, що містить чотири блоки: цільовий, змістовий, організаційно-діяльнісний і результативно-діагностичний.

Метою статті є трансформація системи адміністрування дистанційного навчання відповідно до нових задач та напрямків. Розробка

концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання Збройних Сил України.

Матеріали та методи

Матеріалами для проведення аналізу і роботи над статтею слугував ряд попередніх досліджень та публікацій, які сприяли дослідженню двох напрямків: автоматизація й інтелектуалізація систем управління освітнім процесом та розроблення експертно-навчальних систем.

У дослідженні використовувалися наступні методи: системного аналізу – для дослідження особливостей структури експертно-навчальних систем, процесів та напрямків інтелектуалізації в освіті; синтезу – для формування типової структури концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання ЗС України; формалізації – для змістовного опису процесу функціонування концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання ЗС України.

Результати

До цього часу адміністрування системи дистанційного навчання сприймалось як технічне забезпечення, що складається з процедур та контролю їх виконання.

Згідно з аналізом попередніх досліджень в цій області, експертно-навчальні системи зазвичай використовуються як допоміжний інструмент в освітньому процесі. Вони зазвичай обмежені однією конкретною галуззю і не містять елементів персоналізації. Основна функція таких систем - це оцінювати навчальну діяльність студентів.

Однак, завдяки впровадженню технологій штучного інтелекту в освітній процес дистанційного навчання з'явилася можливість інтелектуалізувати навчання та розширити його функціональність [9]. Це призвело до необхідності розподілу системи адміністрування на декілька складових відповідно до завдань планування, організації, підтримки, управління, контролю та подальшої їх інтелектуалізації. Інтелектуалізація цих процесів дозволить підняти дистанційне навчання на новий якісний рівень, автоматизувати рутинну роботу та зробити її більш ефективною [10]. Крім того, це додасть користувачам зручностей у навчанні. Виходячи з цього, адміністрування системи дистанційного навчання повинно постійно еволюціонувати та ставати складнішим, щоб задовольняти різноманітні потреби користувачів для досягнення кращих результатів.

Основою наукової гіпотези є деталізація функцій адміністрування системи дистанційного навчання, як сукупності визначених напрямків, з метою підвищення її ефективності шляхом створення концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання, яка характеризується вирішенням задач на основі моделей і методів теорії штучного інтелекту. В ході дослідження використовувалися методи

системного аналізу та вирішення складних задач на основі теорії штучного інтелекту в умовах невизначеності.

Для сучасної системи дистанційного навчання процес адміністрування пропонується розділити на чотири напрямки відповідно до його завдань.

Основні завдання системи адміністрування за напрямками.

Адміністрування накопичення (генерування, акумулювання) знань.

отримання, збереження, структурування, оновлення знань;

інтеграція з зовнішніми базами, каталогами, ресурсами.

Адміністрування освітнього процесу.

створення курсів та налаштування їх параметрів;

визначення видів і послідовності занять;

визначення видів контролю і звітності та їх періодичності;

визначення кількості слухачів у навчальних групах;

визначення методів навчання;

поточний аналіз освітнього процесу з відповідними корегуваннями.

Адміністрування кар'єрного зростання.

формування програм підготовки, (підбір) курсів;

відслідковування компетентностей;

формування траєкторії кар'єрного розвитку.

Технічне адміністрування.

підтримка (оновлення) апаратного та програмного забезпечення;

керування обліковими записами та доступом до системи;

створення резервних копій та відновлення системи;

редагування системи;

захист системи від кіберзагроз;

розвиток технічних та програмних складових системи дистанційного навчання.

Основними елементами концептуальної моделі є:

блок логічних висновків (підсистема пошуку рішень) – це сукупність програмних засобів для моделювання ходу міркувань експертів в процесі розв'язання задач, призначений для пошуку і побудови логічних висновків, визначення способів і послідовності використання правил і процедур, вирішення задач за допомогою цих правил використовуючи знання та дані, що зберігаються в базі знань і базах даних, а також інформацію яка надходить з різних систем;

модуль тлумачення – це набір програмних засобів, що демонструють послідовність логічних висновків та міркувань, якими оперувала система в процесі пошуку рішення для розв'язання задачі та повідомляє які знання були при цьому використані;

база знань – це сукупність відомостей про предметну область (у вигляді алгоритмів, методів, правил, методик, законів) для якої розробляється експертно-навчальна система (ЕНС);

експерти – висококваліфіковані фахівці предметної області, які формують базу знань описуючи всі відомі знання та практичний досвід для функціонування ЕНС;

модуль отримання знань - це інтелектуальний редактор, який дозволяє вводити знання в базу знань, оновлювати їх, а також проводити аналіз на несуперечливість;

база даних – сукупність даних певного напрямку (освіта, кадри);

інтерфейс користувача – комплекс програмних засобів, які реалізують інтерактивну взаємодію користувача і експертно-навчальної системи;

адміністратор – фахівець з програмування, що займається підтримкою працездатності та функціонування системи;

модуль аналізу помилок – це програмний модуль, який відповідає за виявлення та аналіз помилок, що роблять слухачі при виконанні завдань в ЕНС. Сприяє зворотному зв'язку з викладачами, корегуванню типової моделі слухача, покращенню ефективності самої експертно-навчальної системи шляхом надання рекомендацій щодо вдосконалення та оптимізації навчальних матеріалів та завдань;

модуль розрахунку часу на виконання завдання – це програмний модуль, який відповідає за визначення часу, який потрібен слухачам на виконання завдання в ЕНС. Цей модуль може враховувати різні параметри, такі як складність завдання, кількість запитань, рівень знань студента, терміновість виконання. Допомагає покращити ефективність навчання, дозволяючи студентам розподілити свій час на виконання завдань більш раціонально, сприяє підвищенню точності планування навчального процесу викладачами.

типова модель слухача – це програмна модель, яка відображає поточний рівень знань та характеристики слухача, що використовуються під час навчання, і є індивідуальною для кожного слухача. Вона допомагає виявляти та коригувати невірні уявлення, уподобання, цілі та якості слухача. Модель слухача має відповідати кінцевій меті навчання та бажаному рівню знань на певних етапах навчання, та персоналізувати інтерфейс навчання для кожного слухача.

Структура концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування СДН дає змогу розглянути кожен напрямок більш детально.

Напрямок адміністрування накопичення знань містить стандартний набір елементів експертно-навчальної системи. Оперуючи готовими науковими кейсами (алгоритмами, методами, правилами, методиками, законами), що зберігаються в базі знань, блок логічних висновків вирішує поставлені задачі.

До напрямку адміністрування освітнього процесу увійшов модуль розрахунку часу на виконання завдання, що дає змогу оптимізувати як навчальний так і планувальний процеси, тим самим підвищити ефективність навчання. До того ж цей напрямок містить модуль аналізу помилок. Цей

модуль надає допомогу викладачам у перевірці виконаних робіт, а також надає інформацію для корекції типової моделі слухача. Вона, в свою чергу, допомагає персоналізувати освітній процес, адаптувати інтерфейс користувача та скорегувати слухача на шляху до кінцевої мети.

Напрямок адміністрування кар'єрного зростання, завдяки отриманню особистих даних слухачів, забезпечує персоналізацію освітнього процесу. Цей напрямок, шляхом автоматизованого відслідковування та аналізу набутих компетентностей і кар'єрного зростання слухачів, надає рекомендації щодо набуття нових необхідних компетентностей для подальшого розвитку і має унікальну можливість супроводу офіцера впродовж усієї його кар'єри.

Напрямок технічного адміністрування забезпечує програмно-технічну підтримку решти напрямків. Крім того, до нього входить ряд елементів основним серед яких є блок логічних висновків. Завдяки інформації з бази знань, усіх баз даних, типової моделі студента він забезпечує інтелектуалізацію логічних висновків і персоналізацію освітнього процесу. А завдяки модулю тлумачення через адаптований до кожного користувача інтерфейс є можливість переглянути не лише конкретні логічні висновки, а й покроковий шлях їх отримання.

Обговорення

Для кращого розуміння загального функціонування запропонованої системи адміністрування дистанційного навчання та детального розгляду кожного напрямку є необхідність зображення її схематично у вигляді концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання (рис 1).

Таким чином, трансформація й удосконалення процесів адміністрування допоможуть у вирішенні нових задач, які виникають при впровадженні технологій штучного інтелекту в освітній процес із використанням технологій дистанційного навчання.

Дослідження показали, що запропонована трансформація й удосконалення процесів адміністрування допоможуть у вирішенні нових завдань, які виникають під час впровадження технологій штучного інтелекту в освітній процес з використанням технологій дистанційного навчання.

Варто підкреслити, що розроблення концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання ЗС України є принципово новим підходом до адміністрування освітнього процесу в цілому.

Запропонована модель відкриває потенційні можливості щодо автоматизації й інтелектуалізації процесів адміністрування СДН ЗС України, дає можливість персоналізувати навчання, адаптуючи його до особливостей і вподобань кожного користувача, що безпосередньо впливає на ефективність навчання.

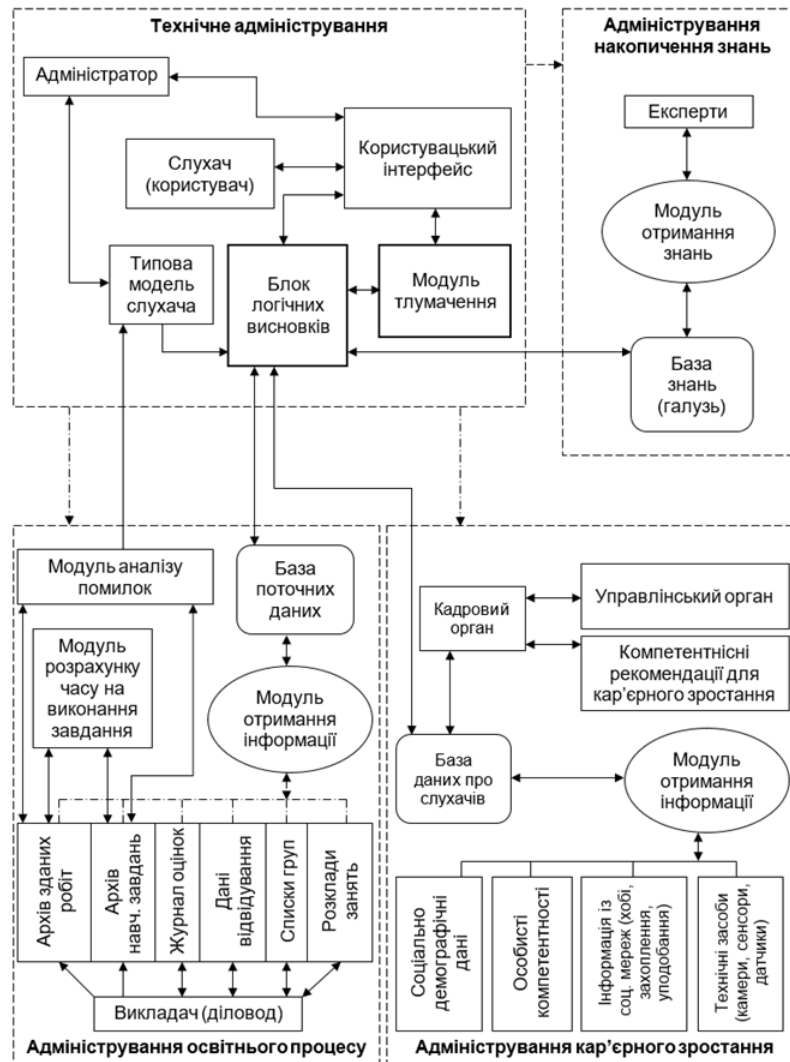


Рисунок 1. Концептуальна модель інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання Збройних Сил України

Концептуальна модель інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання ЗС України має унікальну здатність, надаючи необхідні рекомендації, забезпечувати розвиток офіцера впродовж усієї кар'єри.

Висновки

Отже, розроблення концептуальної моделі інтелектуалізації адміністрування системи дистанційного навчання представляє новаторський підхід до адміністрування. Запропонована модель відкриває нові можливості для автоматизації й інтелектуалізації освітніх процесів.

Однак, для створення дистанційних курсів, система дистанційного навчання потребує використання інформації з обмеженим доступом. Обмін такою інформацією може здійснюватися через систему зв'язку ЗС України, що впливатиме на процеси адміністрування системи дистанційного навчання ЗС України та на більшість напрямків адміністрування, запропонованих у моделі. Цей факт потребує подальшого дослідження для врахування існуючих особливостей та залежностей.

Список використаних джерел

1. Калачова В., Інформаційне забезпечення інформаційно-освітнього середовища для дистанційного навчання в Збройних Силах України. / О. Коломійцев,

С. Ткачук // Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми впровадження дистанційного навчання в освітньому процесі вищих військових навчальних закладів та можливі шляхи їх вирішення” – 2018. – С. 77-82.

2. Романишин Ю., Функціональні аспекти адаптивності технологій дистанційного навчання. / Ю. Романишин, Л. Потеряйло // Міжнародна наукова конференція “Інформація, комунікація, суспільство” – 2018. – С. 287-288.

3. Заболоцький А. Ю. Модель використання системи підтримки e-learning для розвитку ікт-компетентностей працівників центрів дистанційної освіти університетів / А.Ю. Заболоцький // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2020, – №5, – С. 76-81.

4. Ткаченко О. Онтологічне моделювання процесів навчання / О. Ткаченко, К. Ткаченко К., М. Боняр // Міжнародна наукова конференція “ІТ-технології в освіті, мистецтві та культурі”, – 2020, – С. 109-118.

5. Walcutt, J. J. & Schatz, S. (Eds.) (2019). Modernizing Learning: Building the Future Learning Ecosystem. Washington, DC: Government Publishing Office. License: Creative Commons Attribution CC BY 4.0 IGO Міжнародний стандартний номер книжки в Україні ISBN: 978-617-7187-61-4 (2021 рік).

6. Мурадова В. Х. Моделі та інструментальні засоби для експертного оцінювання якості знань в системах дистанційного навчання URL: <https://openarchive.nure.ua/items/5959cd7d-92fd-4d0a-b963-81dbbd524175>

7. Костюченко М. П. Інформаційно-кібернетичні та психолого-дидактичні аспекти проектування експертно-навчальних систем URL: <http://bitly.ws/BAPIJ>

8. Спірін О. Модель використання відкритих електронних науково-освітніх систем для розвитку інформаційно-дослідницької компетентності наукових і науково-педагогічних працівників URL: <http://bitly.ws/BAPy>.

9. Kravchenko Y., Afanasyeva O., Tyshchenko M., Mykus S. Intellectualisation of decision support systems for computer networks: Production-logical F-inference. CEUR Workshop

Proceedings, 2021, vol. 2845, pp. 117–126.

10. Авторський колектив. Теорія і практика дистанційного навчання у Збройних Силах України. Ч. 2: Система електронного навчання вищих військових навчальних закладів та військових навчальних підрозділів закладів вищої освіти: навч.-метод. / колектив авторів; за заг. ред. А. М. Сиротенка. – К.: НУОУ ім. Івана Черняхівського. – 2021. С. 3-35.

¹Yevhenii Makhno (PhD)

<https://orcid.org/0000-0001-9743-1082>

¹Yevhen Rudenko (PhD)

<https://orcid.org/0000-0003-3093-8780>

¹Oleksandr Shapran (PhD)

<https://orcid.org/0000-0002-7093-5608>

²Leonid Artiushin (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine

PARADIGM OF INTELLECTUALISATION OF DISTANCE LEARNING SYSTEM ADMINISTRATION

The introduction of artificial intelligence in distance learning has stimulated the development of new areas in education, significantly expanding the possibilities of automation and intellectualisation of educational processes. This has made learning more personalised and adaptive. However, the potential of distance learning in our country has not yet been fully unlocked. The research is aimed at exploring new directions for the development of distance learning through the intellectualisation of administration processes. This will make it possible to raise distance learning to a new level, especially in the context of new tasks. In addition, the administration of distance learning itself needs to be transformed and expanded in accordance with new opportunities, requirements and complex processes. The paper uses the methods of system analysis, synthesis and formalisation.

The functions, principles of operation and interaction with other systems of the overall system concept are considered. In the process of forming the conceptual model, the analysis of user requirements was taken into account, which allowed us to determine the needs of users and requirements for the system. To facilitate understanding of the system structure, a diagram was developed that describes in detail the relationships between its elements. In addition, data types, requirements for them and their interrelationships in the system were identified. As a result of the development of the conceptual model, a wide range of new possibilities for solving the problems of intellectualising the educational process of the distance learning system was predicted, which will increase the efficiency of learning. The article will be useful for developers of educational systems, distance learning administrators and researchers in the field of educational technologies, as it provides a detailed description of the conceptual model and recommendations for its implementation.

Key words: artificial intelligence, intellectualization, automation, distance learning system, conceptual model, administration.

References

1. Kalachova V., Informatsiine zabezpechennia informatsiino-osvitnoho seredovyschcha dlia dystantsiinoho navchannia v Zbroinykh Sylakh Ukrainy. / O Kolomiitsev, S. Tkachuk // Mizhnarodna nauko-vo-praktychna konferentsiia "Problemy vprovadzhenia dystantsiinoho navchannia v osvitnomu protsesi vyshchykh viiskovykh navchalnykh zakladiv ta mozhlyvi shliakhy yikh vyryshennia" – 2018. – S. 77-82.

2. Romanyshyn Yu., Funktsionalni aspekty adaptivnosti tekhnologii dystantsiinoho navchannia. / Yu. Romanyshyn, L. Poteriailo // Mizhnarodna naukova konferentsiia "Informatsiia, komunikatsiia, suspilstvo" – 2018. – S. 287–288.

3. Zabolotskyi A. Yu. Model vykorystannia systemy pidtrymky e-learning dliarozvytku ikt-kompetentnosti pratsivnykiv tsentriv dystantsiinoi osvity universytetiv / A.Yu. Zabolotskyi // Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia. – 2020. – #5, – S. 76–81.

4. Tkachenko O. Ontolohichne modeliuвання protsesiv navchannia / O. Tkachenko, K. Tkachenko K., M. Boniar // Mizhnarodna naukova konferentsiia "IT-tekhnologii v osviti, mystetstvi ta kulturi", – 2020, – S. 109–118.

5. Walcutt, J. J. & Schatz, S. (Eds.) (2019). Modernizing Learning: Building the Future Learning Ecosystem. Washington, DC: Government Publishing Office. License:

Creative Commons Attribution CC BY 4.0 IGO Mizhnarodnyi standartnyi nomer knyzhky v Ukraini ISBN: 978-617-7187-61-4 (2021 rik).

6. Muradova V. Kh. Modeli ta instrumentalni zasoby dlia ekspertnoho otsiniuvannia yakosti znan v systemakh dystantsiinoho navchannia URL: <https://openarchive.nure.ua/items/5959cd7d-92fd-4d0a-b963-81ddb524175>

7. Kostuchenko M. P. Informatsiino-kibernetichni ta psykholoho-dydaktychni aspekty proektuvannia ekspertno-navchalnykh system URL: <http://bitly.ws/BAPJ>

8. Spirin O. Model vykorystannia vidkrytykh elektronnykh nauko-vo-osvitnikh system dlia rozvytku informatsiino-doslidnytskoi kompetentnosti naukovykh i nauko-vo-pedahohichnykh pratsivnykiv URL: <http://bitly.ws/BAPy>

9. Kravchenko Y., Afanasyeva O., Tyshchenko M., Mykus S. Intellectualisation of decision support systems for computer networks: Production-logical F-inference. CEUR Workshop Proceedings, 2021, vol. 2845, pp. 117–126.

10. Avtorskyi kolektyv. Teoriia i praktyka dystantsiinoho navchannia u Zbroinykh Sylakh Ukrainy. Ch. 2: Sistema elektronnoho navchannia vyshchykh viiskovykh navchalnykh zakladiv ta viiskovykh navchalnykh pidrozdiliv zakladiv vyshchoi osvity: navch.-metod. / kolektyv avtoriv; za zah. red. A. M. Syrotенka. – K.: NUOU im. Ivana Cherniakhovskoho. – 2021. S. 3-35.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОВОАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

[DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72)

[УДК 004.94:629.7.017.1+629.7.018:004.942](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72)

¹Шовкошитний Ігор Іванович (кандидат військових наук, старший науковий співробітник)
<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

²Василенко Ольга Анатоліївна
<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

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

ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЇВ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ УРАЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГРУПОВИХ ЦІЛЕЙ

Досвід російсько-української війни свідчить про те, що одним із перспективних напрямів підвищення ефективності ведення бойових дій в сучасних умовах є перехід до групового (ройового) застосування безпілотної систем для виконання розвідувальних і ударних завдань. Зважаючи на це, статтю присвячено вирішенню актуального наукового завдання, яке полягає у виборі показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних безпілотної літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей.

У публікації висвітлено завдання роїв ударних БпЛА, що поділяються на бойові завдання та завдання підтримки (забезпечення) бойових дій. Виконання кожного з них потребує оцінювання з метою ухвалення обґрунтованих рішень та коригування стратегій ройового застосування ударних БпЛА, які виконуватимуть комплекс завдань щодо виявлення, розпізнавання, ураження як одиночних об'єктів, так і нестационарних групових цілей противника. Таке оцінювання потребує наявності відповідних показників ефективності. З огляду на це, у статті наведено основні вимоги до таких показників, запропоновано варіант загальної класифікації показників ефективності застосування роїв ударних БпЛА з умовним розподілом їх на декілька груп, основними з яких є: функціональні, часові, просторові, часткові, інтегральні, експлуатаційні, воєнно-економічні. Також наведено пояснення та очікувані варіанти функціональних залежностей зазначених показників та інших додаткових параметрів, які впливатимуть на ефективність застосування роїв ударних БпЛА.

Під час проведення дослідження застосовано загальнонаукові методи (аналізу, порівняння), окремі положення системного підходу, теорії імовірностей та теорії надійності систем, а також воєнно-економічного аналізу. Запропоновані показники ефективності можуть бути використані під час формування моделей оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА.

Ключові слова: ударні безпілотної літальні апарати, рій, ройові технології, ефективність застосування, показники ефективності, ураження нестационарних групових цілей.

Вступ

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності ведення бойових дій в сучасних умовах є перехід до групового (ройового) застосування безпілотної систем [1–5]. Це підтверджується бойовими діями під час відбиття широкомасштабної збройної агресії російської федерації проти України. Зокрема, в ході бойових дій рф використовує практику завдання групових ударів БпЛА-камікадзе “Shahed-136” (“Герань-2”),

Ланцет, КУБ-БЛА по об'єктах військової та цивільної інфраструктури [6]. Тенденція до групового застосування ударних БпЛА нині широко впроваджується й у Збройних Силах України (далі – ЗС України), відпрацьовуються форми і способи застосування таких літальних апаратів, які стають суттєвою альтернативою в умовах браку засобів ураження. Протягом останнього року значно зросли обсяги застосування у тактичній ланці FPV-БпЛА, номенклатура та

різновиди яких стрімко збільшуються. Оснащення ударних БпЛА бойовою частиною вагою від сотень грамів до десятків кілограмів дозволяє уражати різні типи цілей у тактичній, а також оперативно-тактичній глибині.

Слід зазначити, що одним із перспективних напрямів нині вважається застосування роїв ударних БпЛА, які прогнозовано матимуть більшу ефективність порівняно із простим застосуванням групи ударних БпЛА, адже теоретично поведінка “роїв” передбачає застосування роєвих алгоритмів на основі принципів самоорганізації, штучного інтелекту й так званих технологій “машинного зору”, що загалом впливає на стійкість рою до впливу зовнішніх факторів, і, як наслідок, – до їхньої результативності. Застосування штучного інтелекту дає можливість об'єднувати БпЛА у рої та організувати обмін інформацією між ними, а також забезпечити самостійне взаємоузгоджене вирішення завдань зі збирання та оброблення інформації щодо складних об'єктів і групових цілей, ідентифікувати їхні елементи, здійснювати розподіл між ударними БпЛА та уражати їх [7–8].

Є інформація щодо випробовування українських аналогів БпЛА “Ланцет” з використанням технологій штучного інтелекту, який забезпечуватиме можливість роєвого застосування груп БпЛА [9]. Українською компанією “Swarmet” розробляється технологія на базі штучного інтелекту, яка дасть можливість об'єднати в єдину мережу одразу кілька десятків БпЛА під управлінням одного пілота [10].

Незважаючи на те, що переваги застосування рою БпЛА є очевидними, цей напрям у ЗС України перебуває на початковому етапі. В умовах відпрацювання тактики групового застосування ударних БпЛА, розвитку та впровадження нових форм і способів ураження з їхньою допомогою об'єктів виникає потреба в оцінюванні ефективності такого застосування. Судячи з наявного бойового досвіду, можна стверджувати, що суттєвими чинниками, які впливають на ефективність застосування груп (роїв) ударних БпЛА, є: можливість та оперативність виявлення та розпізнавання об'єктів ураження, їхня просторова досяжність, спроможність подолання групою БпЛА системи протиповітряної оборони або системи комплексної вогневої та радіоелектронної протидії, ступінь адаптації групи (рою) БпЛА до змін у навколишньому середовищі.

Проте питання щодо оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей досліджені недостатньо. З огляду на зазначене, обрана тема статті, яка присвячена вибору показників та критеріїв такого оцінювання, є актуальною.

Проблеми впровадження технологій роєвого застосування роботизованих комплексів, зокрема БпЛА, досліджуються у багатьох країнах [11]. У [12] розглянуто сучасні погляди на застосування пілотованої та безпілотної авіації в майбутніх військових конфліктах, проведено порівняння завдань, які можуть нею виконуватись. Здійснено класифікацію завдань для спільних авіаційних груп

пілотованої та безпілотної авіації. Питання щодо групового застосування пілотованої авіації для ураження типових об'єктів, а також методичні особливості опису виконання цього завдання ретельно розглядалися у [13]. Класичні підходи до оцінювання ефективності подолання літальними апаратами зони дії ешелюваної протиповітряної оборони досить повно описані в [14, 15].

У роботі [16] розроблено метамодель мультиагентної системи пошуку та впливу на наземний об'єкт групою безпілотної літальних апаратів у разі централізованого варіанта управління. Проведено аналіз досвіду групового застосування безпілотної літальних апаратів під час виконання завдань із пошуку та впливу на об'єкти земної поверхні, визначено ролі агентів та їхні завдання у складі групи. Також визначено завдання інтелектуальної системи управління безпілотної літальними апаратами.

У [17, 18] здійснено аналіз групового застосування БпЛА, у тому числі у спільних бойових порядках з пілотованими, окреслено особливості такого застосування та напрямки досліджень, необхідних для розвитку систем автоматичного керування групами літальних апаратів.

У [19] зосереджено увагу на забезпеченні узгодженого переміщення групи літальних апаратів у просторі. Зокрема, розроблено математичну модель руху БпЛА на основі алгебри дуальних кватерніонів з урахуванням обертального та поступального руху літальних апаратів. У [20, 21] розглянуто проблеми управління групою БпЛА, акцентовано увагу на зростанні складності керування нею у процесі збільшення кількості апаратів. У [22] запропоновано математичну модель узгодженого руху групи БпЛА на основі методу потенціалів, у якій враховано проблемні питання, що стосуються сумісного безаварійного руху декількох БпЛА, уникнення фізичних перешкод на шляху руху, обходу потенційно небезпечної зони, інформаційної зв'язності окремих апаратів. Крім того, запропоновано модель процесу управління повітряним рухом на основі нейронних нечітких мереж.

У дисертаціях [23–25] розглянуто питання щодо організації групового застосування БпЛА. У роботі [26], присвяченій проблемам застосування роєвого інтелекту та побудови стійких керованих груп роботів, автором наголошується, що більшість розробок частіше стосуються вирішення окремої вузькоспеціалізованої проблеми (зокрема знаходження найкоротшого шляху між окремими точками, пошуку ресурсів тощо). Особливо підкреслено проблематику побудови алгоритмів колективної поведінки, а також сформульовано основні вимоги до алгоритмів реалізації колективної поведінки групи роботів.

Отже, очевидно, що окремі питання щодо роєвого застосування об'єктів досліджено достатньо повно. Водночас, можна стверджувати, що у жодному з наведених джерел проблемні питання стосовно оцінювання ефективності роєвого застосування ударних БпЛА, системно не

розглядалися, а перелік показників та критеріїв ефективності досі не сформовано, що підкреслює актуальність теми цієї публікації.

Зважаючи на зазначене, метою статті є вибір показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей.

Матеріали та методи

Дослідження обраної у статті тематики базується на загальнонаукових методах (аналізу, порівняння), положеннях системного підходу до розв'язання складних завдань, окремих положеннях теорій імовірності, надійності систем та воєнно-економічному аналізі.

Результати

Перш ніж сформулювати заявлені показники, доцільно визначити загальні особливості застосування роїв ударних БпЛА. Згідно із [7] під "роєм БпЛА" будемо розуміти групу БпЛА, управління якою здійснюється за допомогою штучного інтелекту із застосуванням алгоритмів самоорганізації, а під "ударними БпЛА" – бойові БпЛА, що здатні самостійно виконувати розвідувальні й ударні завдання з метою виявлення (власними бортовими засобами розвідки) наземних і морських цілей (об'єктів) та їх подальшого ураження бортовою зброєю – інтегрованою бойовою частиною. Складною перспективною задачею для роїв ударних БпЛА є ураження нестационарних групових цілей, під якими слід розуміти рухомі або змінювані у часі й просторі об'єкти, що підлягають ураженню в умовах бойових дій. На відміну від стаціонарних цілей, такі об'єкти можуть змінювати своє місце розташування, швидкість, напрямок руху або інші параметри, що значно ускладнює процес їхнього виявлення, відстеження та знищення ударними БпЛА.

Загалом рої БпЛА на полі бою можуть вирішувати такі завдання:

а) перша група – бойові завдання щодо: виявлення, розпізнавання одиночних і групових цілей (як стаціонарних, так і нестационарних) на землі, водній поверхні та у повітрі;

завдання ударів по групах типових наземних та надводних зосереджених цілей на полі бою (особовий склад противника, зразки озброєння та військової техніки, елементи бойового порядку), а також важливих елементах критичної інфраструктури;

ведення групового повітряного бою з ураженням типових пілотованих та безпілотної літальних апаратів противника (перспективне завдання);

оперативне створення перешкод радіоелектронним системам і засобам управління військами і зброєю противника (перспективне завдання);

б) друга група – завдання підтримки (забезпечення) бойових дій:

ускладнення та дезорганізація функціонування об'єктові та військової ППО шляхом формування хибної повітряної обстановки та імітації групового застосування бойових засобів;

цілевказання засобам вогневого ураження, у тому числі ударним БпЛА;

ретрансляція радіосигналів, формування (розширення) мереж радіозв'язку та передавання даних;

коригування вогню підрозділів ракетних військ і артилерії на значних ділянках лінії зіткнення; дистанційне мінування (розмінування) ділянок місцевості та окремих об'єктів;

дистанційне ведення РХБ розвідки; виконання окремих логістичних завдань (доставка малогабаритних вантажів, зокрема боєприпасів, засобів медичної допомоги тощо);

деморалізація та піддрив морально-психологічного стану особового складу противника шляхом поширення агітаційних матеріалів, демонстраційних польотів тощо.

імітація групових нальотів засобів повітряного нападу (роїв БпЛА) з метою тренування обслуг засобів ППО та пілотів винищувальної й армійської авіації.

Слід зауважити, що кожне із цих завдань застосування роїв БпЛА може потребувати визначення відповідних показників ефективності. Проте у статті увагу зосереджено на визначенні показників ефективності виконання завдань першої групи, зокрема застосування роїв ударних БпЛА для виявлення, розпізнавання, ураження одиночних цілей і нестационарних групових цілей противника.

Правильно визначені показники ефективності сприятимуть ухваленню обґрунтованих рішень та коригуванню стратегій для досягнення найкращих результатів ройового застосування ударних БпЛА.

Основні вимоги до показників ефективності:

чітка визначеність, зрозумілість, повнота та точність опису змісту вимірюваних параметрів, легка інтерпретованість, простота обчислювання; чутливість до будь-яких впливів внутрішніх і зовнішніх факторів;

можливість отримання кількісних значень, які можна об'єктивно оцінювати (це не виключає можливості використання й чітко сформульованих якісних показників);

реалістичність, досяжність, зв'язок із загальними цілями системи.

Важливо також враховувати, що обрані показники ефективності за необхідності може бути скориговано залежно від змін у зовнішньому середовищі або еволюції систем чи процесів.

Взявши до уваги основи системного підходу до оцінювання ефективності складних систем [27–31], показники ефективності рою ударних БпЛА слід розділити на внутрішньосистемні та показники ефективності, які задаються надсистемою (тобто системою, в інтересах якої буде застосовуватись рій ударних БпЛА). У даному випадку надсистемою може бути система комплексного вогневого ураження противника, метою якої є виявлення та ураження якомога більшої кількості цілей (об'єктів) противника. Також показники можуть бути часткові та узагальнені.

Залежно від змісту задачі показники ефективності можуть мати різну значущість. Із системи показників необхідно вибрати один або

кілька найважливіших, значення яких характеризують ступінь досягнення мети (у нашому випадку – ефективне ураження одиночних та нестационарних групових цілей роями БПЛА). Оскільки необхідно оцінити ефективність складної системи “рій БПЛА, що уражає нестационарні групові цілі”, слід використовувати систему з кількох показників. Варіант загальної класифікації показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА наведено на рис. 1.



Рисунок 1. Загальна класифікація показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА (варіант)

З урахуванням запропонованої класифікації показників ефективності (рис. 1) розглянемо варіант їхнього змісту, зважаючи на те, що найбільш суттєвими, з точки зору застосування роїв ударних БПЛА, є функціональні показники, які характеризують кінцеву мету – ураження нестационарних групових цілей противника. На рис. 1 також показано, що найбільш прийнятним інтегральним показником ефективності рою міг би стати один із функціональних показників, який би

узагальнював часткові показники як певну функцію (виявлення, розпізнавання, наведення та ураження) і відносно “об’єктивно” характеризував ефективність конкретного рою за конкретних умов обстановки. Проте, залежно від цих умов, можуть бути корисними й інші показники ефективності.

Більш детально зміст показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА наведено нижче, з умовним розподілом на декілька груп:

функціональні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 1);

якісні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 2);

часові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 3);

просторові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 4);

експлуатаційні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 5);

воєнно-економічні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 6);

інтегральні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 7).

У таблицях наведено пояснення та очікувані варіанти функціональних залежностей зазначених показників та інших додаткових параметрів, які впливатимуть на ефективність застосування роїв ударних БПЛА.

Також слід зауважити, що представлена на рис. 1 класифікація передбачає наявність кількісних та якісних показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА. Але такі показники не виділені в окремі групи, тому що кількісна або якісна інтерпретація є притаманною практично всім показникам, об’єднаним у наведених вище групах.

Залежно від змісту вирішуваних завдань, іноді кількісні показники ефективності можуть мати перевагу над якісними, оскільки вони базуються на чисельних даних, що робить їх менш суб’єктивними і більш точними. Вони можуть бути виміряні та перевірені, що мінімізує можливість хибних або неоднозначних інтерпретацій.

Таблиця 1

Функціональні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
n	Кількість виявлених одиночних об’єктів групової цілі
$n_{кр}$	Кількість виявлених критичних одиночних об’єктів групової цілі. Цей показник є необхідним, адже кількість одиночних об’єктів групової цілі може значно перевищувати кількість БПЛА у рою, що впливатиме на можливість завдання “критичного збитку” групової цілі $n_{кр} \leq n$
P_e	Ймовірність виявлення одиночного об’єкта групової цілі. Зазначена імовірність залежить від багатьох чинників (стан зовнішнього середовища, рівень маскуванню, кількість БПЛА рою, призначених для ведення розвідки, типів оптико-електронних засобів у цільовому навантаженні БПЛА, співвідношення можливого часу перебування БПЛА у польоті та часу, необхідного для огляду групової просторово розосередженої цілі тощо)
P_e^z	Ймовірність виявлення заданої кількості одиночних об’єктів групової цілі за заданий час t $P_e^z = f(P_e, n^z, t), n^z \leq n$
$P_{e(n)}$	Ймовірність виявлення всіх одиночних об’єктів групової цілі $P_{e(n)} = f(P_e, n)$

1	2
$P_{e(n_{кр})}$	Ймовірність виявлення заданої кількості критичних одиночних об'єктів групової цілі $P_{e(n_{кр})} = f(P_e, n, n_{кр})$
$P_{eГЦ}$	Ймовірність виявлення однієї групової цілі за заданий час t $P_{eГЦ} = f(P_e, n, N, t), N = 1$
$P_{eГЦ}^3$	Ймовірність виявлення заданої кількості групових цілей N за заданий час t $P_{eГЦ}^3 = f(P_e, n, N, t), N > 1$
$M_{e(n)}$	Математичне сподівання кількості виявлених одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час t $M_{e(n)} = f(P_e, n, t)$
$M_{e(n_{кр})}$	Математичне сподівання кількості виявлених критичних одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час t $M_{e(n_{кр})} = f(P_e, n_{кр}, t)$
Показники ефективності розпізнавання групових цілей роями БпЛА	
P_p	Ймовірність розпізнавання одиночного об'єкта групової цілі $P_p = f(P_e, \Psi)$, де Ψ – множина властивостей об'єкта та показників, які характеризують умови розпізнавання об'єктів (контрастність, освітленість, ступінь та якість маскування тощо)
$P_{pГЦ}$	Ймовірність розпізнавання групової цілі за заданий час t $P_{pГЦ} = f(P_{e(n)}, P_p, n_{p(n_{кр})}, n, t)$
$n_{p(n_{кр})}$	Кількість розпізнаних критичних одиночних об'єктів групової цілі $n_{p(n_{кр})} = f(P_{e(n)}, P_p)$
$P_{p_{кр}}$	Ймовірність розпізнавання одного критичного одиночного об'єкта групової цілі $P_{p_{кр}} = f(P_{e(n_{кр})}, n_{кр})$
$M_{p(n)}$	Математичне сподівання кількості розпізнаних одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час t $M_{p(n)} = f(P_p, n, t)$
$M_{e(n_{кр})}$	Математичне сподівання кількості розпізнаних критичних одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час t $M_{p(n_{кр})} = f(P_p, n_{кр}, t)$
Показники ефективності наведення роїв БпЛА	
P_{np}	Ймовірність наведення рою БпЛА у район зосередження групової цілі $P_{np} = f(\Psi_{np}, P_{en}, P_{РЕП})$, де Ψ_{np} – множина властивостей (показників), які характеризують можливість апріорної обізнаності стосовно координат розташування групових цілей, умов виконання завдання та просторової досяжності групових цілей для роїв БпЛА P_{en} – ймовірність подолання системи вогневої протидії противника; $P_{РЕП}$ – ймовірність подолання зони радіоелектронної протидії противника
$P_{nГЦ}$	Ймовірність наведення рою БпЛА на групову ціль $P_{nГЦ} = f(P_{np}, P_{eГЦ}, P_{pГЦ})$
P_n	Ймовірність наведення одного БпЛА зі складу рою на одиночний об'єкт групової цілі $P_n = f(P_{np}, P_e, P_p, n)$
Показники ефективності ураження групових цілей роями БпЛА	
n_y	Кількість уражених одиночних об'єктів групової цілі $n_y = f(P_y)$
P_y	Ймовірність ураження одиночного об'єкта групової цілі $P_y = f(P_{np}, P_e, P_p, P_n, r_y)$, де r_y – радіус зони ураження одного ударного БпЛА (залежить від типу та потужності бойової частини)
$P_{y_{кр}}$	Ймовірність ураження критичного одиночного об'єкта групової цілі $P_{y_{кр}} = f(P_{np}, P_e, n_{кр}, P_{p_{кр}})$

1	2
$P_{y(n_{кр})}^3$	Ймовірність ураження достатньої кількості критичних одиночних об'єктів ($n_{кр}^3$) для виведення з ладу групової цілі $P_{y(n_{кр})}^3 = f(n, n_{кр}, n_{кр}^3, P_{np}, P_{y_{кр}}), n \geq n_{кр} \geq n_{кр}^3$
$M_{y(n)}$	Математичне сподівання кількості уражених одиночних об'єктів групової цілі $M_{y(n)} = f(n, P_{np}, P_{в}, P_p, P_y)$
$M_{y_{ГЦ}}$	Математичне сподівання кількості уражених (виведених з ладу) групових цілей $M_{y_{ГЦ}} = \sum_i M_{y_{ГЦ_i}} = f(N_{ГЦ_i}, P_{np_i}, P_{в_i}, P_{p_i}, P_{y_i}), i = \overline{1, N}$, де i – тип групової цілі. Зазначений показник має аналог. Зокрема, в наукових публікаціях зустрічається такий показник, як математичне сподівання числа успішного виконаних бойових завдань. У його основі лежить ймовірність виконання одного бойового завдання, що виконується декількома БПЛА: $P_1 = K_{oc} K_n P_{б} P_{виявл} P_p P_c P_{ni} Q P_{пз} P_{бз} (P_{пз})$, де K_{oc} – коефіцієнт, що характеризує готовність особового складу до виконання бойових завдань; K_n – коефіцієнт, що враховує природні фактори: лісистість, рельєф місцевості, дорожні умови, хмарність, вітер, туман та ін.; $P_{б}$ – ймовірність безвідмовної роботи (надійність застосування) БПЛА; $P_{виявл}$ – ймовірність виявлення об'єкта розвідки; P_p – ймовірність розпізнавання об'єкта розвідки; P_c – ймовірність прихованого функціонування БПЛА (його не виявлення); P_{ni} – ймовірність передавання інформації на пункт управління; Q – ймовірність неураження БПЛА засобами ППО противника; $P_{пз}$ – ймовірність успішного зайняття позиційного району (вчасність пуску БПЛА, не ураження підрозділу на шляху висування); $P_{бз} (P_{пз})$ – ймовірність виконання завдання з визначеного позиційного району (не ураження підрозділу в позиційному районі за час виконання БПЛА польотного завдання)
$P_{БЗ}^3$	Ймовірність виконання заданої кількості бойових завдань з ураження групових цілей (N^3) роєм БПЛА $P_{БЗ}^3 = f(P_{вГЦ}^3, P_{p_{ГЦ}}, P_{np_i}, P_{пГЦ}, P_{y(n_{кр})}^3, P_{п}, n_i, n_{БПЛА})$ за умови $n_{БПЛА} \gg \sum_{i=1}^{N^3} n_i$, де $n_{БПЛА}$ – кількість БПЛА у рою; $P_{п}$ – ймовірність подолання роєм БПЛА зони вогневої та невогневої протидії противника
$P_{БЗ1}(t)$	Ймовірність виконання роєм БПЛА одного бойового завдання (з ураження однієї групової цілі) за заданий час $P_{БЗ1}(t) = f(P_{вГЦ}, P_{pГЦ}, P_{пГЦ}, P_{y(n_{кр})}^3)$

У табл. 1 можна побачити, що показники доволі повно охоплюють функції, які виконуються роями БПЛА на різних етапах бойового застосування. Останні два показники і характеризують ефективність комплексного виконання роями

БПЛА бойових завдань, тому вони також належать до групи інтегральних показників ефективності, які мають практичну значущість на рівні угруповань військ (сил) під час планування ураження групових нестационарних цілей роями ударних БПЛА.

Таблиця 2

Якісні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
S	Ступінь самоорганізації рою БПЛА під час виконання бойового завдання. Цей показник є комплексним і може характеризувати здатність рою самостійно (без участі оператора) виконувати часткові завдання на маршруті польоту, розпізнавати поточні загрози, ідентифікувати групові цілі та їхні окремі елементи, оцінювати пріоритети ураження, здійснювати реконфігурацію рою у разі втрати частини БПЛА в умовах протидії противника. За певним набором критеріїв цей показник може задаватись деякою якісною шкалою (наприклад, шкалою Уея, Харрінгтона або Сааті)

1	2
z	Ступінь стійкості до зовнішніх впливів. Цей показник пов'язаний із попереднім і характеризує здатність рою БПЛА функціонувати ефективно, навіть за умов виходу з ладу (втрати) частини БПЛА зі складу рою. Стійкість має забезпечуватись за умов: децентралізованого управління БПЛА; наявності стійкого зв'язку та обміну інформацією між БПЛА, що дозволяє їм оперативно адаптуватися до зміни умов у реальному часі; розподілення завдань (функцій) між однаковими багатофункціональними БПЛА рою, що робить його стійким до втрат окремих БПЛА; алгоритмів адаптації до змін умов обстановки (завдань, перешкод, маршрутів тощо)
Y_{ep}	Якість виявлення групової цілі та її розпізнавання. Така якість залежить від типу сенсорів БПЛА рою, алгоритмів оброблення даних, часу реакції та координатної інформації, отриманої з різних джерел (сенсорів БПЛА). Зазвичай основними сенсорами роїв БПЛА є оптико-електронні засоби, а якість виявлення цілей залежатиме від їхньої видимості, яка залежить від часу спостереження, ракурсу спостереження, освітленості та фоновому контрасту об'єкта спостереження

У табл. 2 продемонстровано, що за своїм змістом запропоновані показники характеризують не кінцевий ефект застосування роїв ударних БПЛА, а характерні властивості цих роїв з акцентуванням на їхній якісній інтерпретації. Такі показники можуть використовуватись як додаткові під час планування бойового застосування роїв ударних БПЛА.

Таблиця 3

Часові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
M_t	Математичне сподівання середнього часу виявлення типових одиночних об'єктів у складі групової цілі $M_t = \frac{1}{n} \sum_i t_i, i \in \mathbb{N},$ <p>де t_i – час виявлення типового i-го одиночного об'єкта у складі групової цілі. Відповідно до класичного визначення математичного сподівання показник відображає середнє значення часу виявлення типового i-го одиночного об'єкта нестационарної групової цілі. Також цей показник одночасно належить до групи як функціональних (відображають рівень виконання функції виявлення об'єктів), так і часових показників. Подібний показник можна використовувати й для часу розпізнавання (ураження) одиночних об'єктів у складі групової цілі.</p>
$M_{гц}$	Математичне сподівання середнього часу виявлення типових групових цілей $M_{гц} = f(t_{гц_j}, J) = \frac{1}{J} \sum_j t_{гц_j}, J \geq 1,$ <p>де $t_{гц_j}$ – час виявлення типової j-ої нестационарної групової цілі. Показник відображає середнє значення часу виявлення типових j-их нестационарних групових цілей $j = \overline{1, J}$. Подібний показник можна використовувати й для часу розпізнавання (ураження) типових групових цілей.</p>
$t_{бз}$	Час виконання роєм БПЛА бойового завдання з виявлення розпізнавання та ураження визначеного типу групової цілі $t_{бз} = t_0 + t_n + (t_e + t_p + t_y)$, <p>де t_0, t_n – відповідно час підготовки рою до вильоту та час польоту до району виконання бойового завдання.</p>
$M_{ібз}$	Математичне сподівання середнього часу виконання бойового завдання з виявлення розпізнавання та ураження визначеного типу групової цілі

Таблиця 4

Просторові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
$L_{ypч}$	Глибина застосування роїв ударних БПЛА $L_{ypч} = f(D_3, D_6)$, <p>де D_3, D_6 – відповідно дальність застосування БПЛА і відстань базування підрозділу ударних БПЛА від лінії зіткнення військ</p>

1	2
k_{si}	<p>Коефіцієнт зони виконання бойових завдань роєм ударних БПЛА</p> <p>Значення цього коефіцієнта може бути описано S-подібною функцією належності – мірою перетину площі необхідної зони виконання завдань (S_0) та частки площі цієї зони, яка перекривається i-ою зоною можливих дій рою БПЛА (S_i^+) і відповідно до їх нечіткого співвідношення він може бути визначений за виразом:</p> $k_{si} = \mu(\Omega_{S_0} \cap \Omega_{S_i}) = \begin{cases} 0, & \Omega_{S_0} \cap \Omega_{S_i} = \emptyset, \\ 0 < S_i^+ / S_0 < 1, & \Omega_{S_0} \subseteq \Omega_{S_i}, \\ 1, & \Omega_{S_i} \subset \Omega_{S_0}, \end{cases}$ <p>де Ω_{S^*} – область простору площею S^*, яка перекривається зоною можливих дій рою БПЛА.</p>

Таблиця 5

Експлуатаційні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
k_{tr}	<p>Коефіцієнт технічної готовності БПЛА до виконання бойового завдання у складі рою</p> $k_{tr} = f(t_\phi, t_\Sigma),$ <p>де t_ϕ, t_Σ – відповідно час безвідмовного функціонування БПЛА та сумарного часу безвідмовного функціонування й відновлення</p>
k_r	<p>Коефіцієнт готовності рою БПЛА до виконання бойового завдання</p> $k_r(t) = f(n_r(t), n_{БПЛА}),$ <p>де $n_r(t)$ – відповідно кількість БПЛА у рою, які будуть готовими до бойового застосування на момент часу t</p>
P_ϕ	Ймовірність безвідмовного функціонування одного БПЛА у рою $P_\phi = f(t_\Sigma)$

Таблиця 6

Воєнно-економічні показники ефективності застосування рою ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
Q	<p>Співвідношення вартості загальної кількості витрачених ударних БПЛА до загальної вартості знищених одиночних об'єктів групової цілі</p> $Q = \frac{\sum_i n_i \cdot c_i}{\sum_j N_j \cdot C_j}, i, j \in \mathbb{N}$
δn	<p>Відносна кількість витрачених ударних БПЛА для виведення з ладу (ураження) групової цілі</p> $\delta n = \frac{\sum_i n_i}{\sum_j (n_{крj}^3)}$

Таблиця 7

Інтегральні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
$M_{БП}$	<p>Математичне сподівання кількості виконаних завдань щодо викриття бойового потенціалу угруповання противника. Зазначений показник використовується у методиці оцінювання ефективності застосування розвідувально-ударних безпілотної авіаційних комплексів у складі розвідувально-ударної системи в операції оперативно-тактичного угруповання військ (сил). Зазначений показник може бути використано у випадку оцінювання ефективності виявлення та ураження багатьох об'єктів угруповання противника. Він відображає співвідношення математичного сподівання кількості виконаних завдань щодо викриття (знищення) об'єктів противника (M) до загальної кількості об'єктів противника у зоні відповідальності (J) з урахуванням бойового потенціалу одиночного об'єкта противника (ω_j), визначення якого зазвичай є складною проблемою.</p> $M_{БП} = f(M, J, \omega_j)$

1	2
$M_{з\text{ГЦ}}$	<p>Математичне сподівання кількості знищених групових цілей роєм БПЛА у зоні відповідальності</p> $M_{з\text{ГЦ}} = f\left(\Omega_{\text{до}}, N_{\text{ГЦ}}, P_{y(\text{кр})}^3\right).$ <p>Показник має сенс як для оцінювання ефективності одного рою БПЛА, так і для окремого бойового завдання, яке виконується одним чи декількома роями ударних БПЛА</p>
$\delta_{\text{БП}}$	<p>Відносне зниження бойового потенціалу угруповання противника шляхом ураження групових цілей роями БПЛА</p> $\delta_{\text{БП}} = \frac{W(N_{\text{ГЦ}})}{W_{\Sigma}},$ <p>де W_{Σ} – загальний бойовий потенціал угруповання противника; $W(N_{\text{ГЦ}})$ – частка знищеного бойового потенціалу угруповання противника шляхом знищення групових цілей роями БПЛА. Показник може застосовуватись, якщо розглядається застосування роїв БПЛА в масштабах угруповання військ</p>
δM	<p>Відносне математичне сподівання кількості знищених групових цілей у зоні відповідальності рою БПЛА</p> $\delta M = \frac{\sum_i M_{y\text{ГЦ}i}}{\sum_j N_{\text{ГЦ}j}}$

Обговорення

Вибір показників ефективності роїв ударних безпілотної літальних апаратів (БПЛА) є важливим етапом у процесі планування їх застосування або аналізу (прогнозування) результатів виконання ними комплексу завдань щодо виявлення (розвідки) одиночних та групових цілей, спостереження за ними, розпізнавання їх за певними групами ознак, оцінювання пріоритетності цілей, наведення (самонаведення) на них, ураження та оцінювання наслідків застосування. Правильний вибір показників дозволяє оцінити успішність рою та ефективність виконання поставлених завдань, а підхід до вибору цих показників залежить від конкретизації розв'язуваної роєм задачі – глобальної або часткової. Вибір показників здійснюється особою, яка ухвалюватиме рішення відповідно до власного досвіду, наявної інформації щодо можливостей підрозділів ударних БПЛА, умов обстановки, оцінки потенційних об'єктів (цілей) ураження. У будь-якому разі, до основних етапів вибору показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА належать:

визначення мети застосування рою ударних БПЛА. Оскільки мета може бути різною (від виявлення, спостереження, цілевказання і до безпосереднього ураження одиночних об'єктів у складі групової цілі або загалом групових цілей), показники ефективності можуть обиратись з наведеного переліку функціональних показників (табл. 1), які характеризують відповідні етапи застосування роїв БПЛА (виявлення, розпізнавання, наведення, ураження тощо). При цьому слід обирати показники, які стосуються дій рою БПЛА проти одиночних об'єктів або проти групових цілей;

аналіз основних параметрів рою ударних БПЛА, який буде застосовуватись. Цей етап є складовою оцінювання обстановки, зокрема оцінювання

можливостей своїх сил і засобів. На цьому етапі важливо оцінити (знати) характеристики та функціональність кожного одиночного БПЛА, а також колективних можливостей всього рою. Зокрема, важливо враховувати такі показники, як дальність польоту, цільове навантаження, тривалість автономної роботи, здатність до самоорганізації та можливості стійкої комунікації між БПЛА рою в умовах відсутності зв'язку з оператором та впливів з боку противника;

збирання даних та аналіз обстановки. Цей етап передбачає оцінювання зовнішніх умов застосування роїв БПЛА у реальних операціях (умови обстановки, оцінювання характеристик потенційних маршрутів польоту, оцінювання характеристик потенційних об'єктів ураження тощо). Отримані на цьому етапі характеристики прямо не вказують на ефективність застосування роїв БПЛА, але є важливими параметрами для визначення показників такої ефективності та додатково дозволяють оцінити досяжність визначеної мети;

вибір ключових показників ефективності застосування рою ударних БПЛА. Показники мають відповідати меті оцінювання, тобто відповідати на питання: що оцінюється – кінцевий результат або певні аспекти застосування роїв БПЛА.

У разі необхідності оцінювання можливості досягнення визначеної мети або реалістичності виконання визначених завдань ключовими слід вважати показники, які характеризують часові та просторові можливості роїв БПЛА (див. табл. 3–4). При цьому важливо враховувати розміри зони відповідальності, просторове розміщення потенційних об'єктів (цілей) ураження, їхню досяжність для роїв БПЛА та часові показники (потрібний час для виконання завдання від моменту його отримання), можливу тривалість операції,

середній час виконання типових завдань з ураження типових одиночних об'єктів або групових цілей.

Якщо необхідно оцінити співвідношення ефекту та вартості застосування роїв БпЛА, логічно буде використовувати типові військово-економічні показники, низку яких наведено у табл. 6. Застосування таких показників сприятиме вибору більш раціональних (з точки зору витрати ресурсів) стратегій застосування роїв БпЛА або формуванню більш обґрунтованих замовлень щодо постачання БпЛА певних типів для виконання прогнозованих бойових завдань.

У разі необхідності оцінити кінцевий результат застосування роїв БпЛА слід скористатись комплексними показниками ефективності, які виражають наприклад, кількість або математичне сподівання кількості уражених цілей (об'єктів), а у разі наявності часових обмежень – математичне сподівання кількості уражених за визначений час об'єктів (цілей) або кількості виконаних бойових завдань (див. табл. 7).

Дотримання зазначених етапів, які наразі може бути уточнено, дозволить забезпечити комплексний підхід до оцінювання ефективності бойового застосування роїв ударних БпЛА (як порівняно нової форми ведення бойових дій), що сприятиме оптимізації тактики такого застосування, і підвищити ймовірність успішного виконання ними бойових завдань.

Наведений у цій статті структурований перелік показників ефективності, їхній загальний формалізований опис не є сталим і в подальшому може уточнюватись із набуттям досвіду, розширенням масштабів застосування роїв ударних БпЛА у бойових умовах, а також можливою появою певних особливостей їх бойового застосування. Більшість запропонованих показників сформульовано у вигляді функціональних залежностей від певних груп ключових параметрів, взаємозв'язок яких потребує подальшої деталізації у розроблених надалі математичних моделях. Залежно від ситуації запропоновані показники ефективності надалі можуть коригуватись залежно від специфіки обстановки, в якій застосовуватимуться (або будуть експлуатуватись) рої ударних БпЛА, а також масштабів.

Оскільки остаточних варіантів формування роїв ударних БпЛА нині немає, у подальшому показники ефективності може бути уточнено для випадків застосування однорідних роїв або роїв БпЛА з різними функціями. Також важливим напрямом досліджень слід вважати обґрунтування критеріїв ефективності застосування роїв БпЛА.

Отже, постійний аналіз і оптимізація системи показників оцінювання ефективності сприятимуть розвитку методології оцінювання ефективності роїв БпЛА, що дасть можливість досягти кращих результатів у майбутніх операціях.

Висновки

Таким чином, у статті вирішено актуальне завдання, яке стосується вибору показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей. Запропоновано варіант загальної класифікації показників ефективності з умовним їх розподілом на декілька груп, наведено пояснення та очікувані варіанти функціональних залежностей зазначених

показників та інших додаткових параметрів, які впливатимуть на ефективність застосування роїв ударних БпЛА. Наведені показники ефективності може бути використано під час формування моделей оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА. Водночас, представлений перелік показників не є вичерпним і може коригуватись залежно від змісту виконуваних завдань та обсягу доступних вихідних даних. Оскільки остаточних варіантів формування роїв ударних БпЛА нині немає, у подальшому показники ефективності може бути уточнено для випадків застосування онорідних роїв або роїв БпЛА з різними функціями. Також важливими напрямками досліджень слід вважати:

обґрунтування критеріїв ефективності застосування роїв БпЛА;

розроблення математичних моделей ураження нестационарних неоднорідних групових цілей однорідними та неоднорідними роями БпЛА;

пошук способів розв'язання задач кластеризації та класифікації об'єктів (цілей) ураження із застосуванням методів та алгоритмів штучного інтелекту, а саме нейронних мереж;

розв'язання задачі оптимального розподілу ударних БпЛА по об'єктах нестационарної неоднорідної групової цілі з урахуванням їхньої пріоритетності, а також оцінювання ефективності роєвого застосування БпЛА.

Матеріали, що подані у статті, можуть бути корисними науковим та науково-педагогічним працівникам у галузі математичного моделювання складних систем воєнного призначення, а також здобувачам вищої освіти (курсантам, студентам, слухачам та ад'юнктам), які вивчають зазначені питання.

Список використаних джерел

1. Kharchenko O. V., Artushin L. M., Kononov O. A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Зб. наук. пр. ДНДІА*. 2022. № 18 (25). С. 7–13. DOI: 10.54858/dndia.2022-18-1.
2. Мосов С. П. Рої дронів військового призначення: реальність та перспективи. *Зб. наук. пр. Центру воєнно-стратегічних досліджень Нац. ун-ту оборони України*. 2024. № 1(80). С. 77–86.
3. Горбулін В. П., Мосов С. П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. *Вісн. НАН України*. 2024. № 3. С. 3–11.
4. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. Розпорядження КМ України від 2.12.2020 № 1556-р. Ред. від 29.12.2021, підстава – 1787-2021-р. URL: <http://surl.li/ldhyuf>.
5. Про нарощування спроможностей сил оборони: Указ Президента України від 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (дата звернення 10.10.2024).
6. Воєнно-історичний опис російсько-української війни. У 63 Вип. 18: серпень 2023 р. МО України, Апарат Головнокомандувача ЗС України, ГШ ЗС України та Центр досліджень воєнної історії ЗС України. Київ. 2023. 204 с.
7. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Проблемні питання роєвого застосування ударних безпілотної літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. *Наук. журн. Нац. ун-ту оборони України*. Київ. 2023. Т. 48. № 3. С. 27–34.
8. Гусак Ю. А., Василенко О. А. Кластеризація та класифікація ударних безпілотної літальних апаратів на основі нейронних мереж. *Повітряна міць України*. 2024. 1 (6). С. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-141-152>.
9. Оснащений штучним інтелектом та долає ПЕБ: як працює новий український дрон. URL: <http://surl.li/oivqnx2> (дата звернення: 10.09.2024).

10. В Україні розробляють технологію “рою дронів”. URL: surl.li/fgtwn (дата звернення: 10.09.2024).
11. Василенко О. А. Застосування роїв ударних безпілотних літальних апаратів підрозділами збройних сил провідних держав світу. Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2024. Pp. 118–121. URL: <http://surl.li/cnmoze>
12. Ярошенко Я. В., Герасименко В. В., Коротін С. М., Мартинюк О. Р. Класифікація завдань спільного бойового порядку пілотованої та безпілотної авіації в операціях. Повітряна міць України. ІА та ППО НУОУ. 2021. № 1. С. 41–46.
13. Романченко І. С., Загорка О. М., Бутенко С. Г., Дейнега О. В. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітними цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони). Моногр. Житомир: “Полісся”, 2011. 344 с.
14. Шустов Л. Н. Комплексы радиоэлектронной борьбы авиации вооруженных сил и их эксплуатация / Л. Н. Шустов, И. Н. Гончаров. Москва: ВВИА, 1980. 475 с.
15. Комиссаров Ю. А. Основы радиоэлектронного противодействия в ВВС / Ю. А. Комиссаров, П. А. Лимонов, К. К. Полянский и др. Киев: КВИАУ ВВС, 1970. 474 с.
16. Матюшенко, О. Г., Тристан, А. В. Групове застосування безпілотних літальних апаратів у місіях з пошуку та впливу на наземний об’єкт. Повітряна міць України. 2021. 1(1). 94–96. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-94-96>
17. Коваль В. В., Артюшин Л. М., Семон Б. Й., Лобанов А. А., Герасименко В. В. Підходи до формулювання стратегії управління спільними бойовими порядками пілотованої та безпілотної авіації. Наука і оборона. 2021. № 4. С. 34–43.
18. Артюшин Л. М., Лобанов А. А., Герасименко В. В. Математична модель побудови бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2021. № 2 (41). С. 23–30. DOI: [10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30).
19. Пулеко І. В., Андрєєв О. В., Дубина О. Ф., Чумакевич А. С. Модель руху безпілотних літальних апаратів на основі алгебри дуальних кватерніонів. Житомирський військ. ін-т ім. С. П. Корольова. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2022. Вип. 23. С. 52–61.
20. Мажара І. П., Тимочко О. І. Модель процесу управління повітряним рухом на основі нейронних нечітких мереж. Наука і техніка ПС ЗС України. 2021. № 2 (43). С. 61–65.
21. Самоїленко О. В., Богославець С. О., Стещенко П. М., Наусенко Б. Ю. Особливості керування спільними бойовими порядками безпілотних і пілотованих літальних апаратів. Київ: Держ. наук.-досл. ін-т авіації, 2021. Вип. 17 (24). С. 45–49.
22. Мартинюк О. Р. Модель узгодженого руху групи безпілотних літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2016. № 1. С. 78–81.
23. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan, Muhammad Shafiq. Motion planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. Aeronautics - New Advances. 2022. 244 с. URL: <https://cutt.ly/bwvukUH7>. (дата звернення: 17.09.2024).
24. Абдураїмов Т. З. Алгоритм глибинного аналізу даних для задачі класифікації на основі штучного бджолиного рою. Магістр. Дис. ... 123. Київ: НТУ України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”. 2020. 107 с.
25. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об’єктів. Дис. ... канд. техн. наук. 05.13.06. Харків: ХНУПС. 2020. 192 с.
26. Сахопотинов Г. А., Сыркин И. С. Проблемы практического применения роевого интеллекта и построение устойчивых управляемых групп роботов. URL: <https://cutt.ly/0wvujXN3>. (дата звернення: 10.09.2024).
27. Пашенко Т. П., Микусь С. А., Солонников В. Г. та ін. Методи моделювання бойових дій військ (сил). навч. посіб. Київ: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2021. 272 с.
28. Ачкасов А. Є., Лушкін В. А., Охріменко В. М., Воронкова Т. Б. Теорія систем і системний аналіз: навч. посіб. Харків: ХНУМГ, 2014. 167 с.
29. Месарович М., Мако Д., Такахага І. Теорія ієрархічних багатоуровневих систем. Москва: Мир, 1973. 312 с.
30. Згуровский М. З. Системный анализ. Проблемы, методология, приложения. Моногр. Ин-т прикладного системного анализа НАН Украины. [2-е изд., перераб. и доп.]. Киев: Наук. думка, 2011. 726 с.
31. Майзер Х., Ейджин Н., Тролл Р. Исследование операций. В 2-х т. Под ред. Дж.Моудера, С. Элмгагри. Москва: Мир, 1981. Т. 1. 712 с.

¹**Ihor Shovkoshytnyi** (PhD of Military Sciences, Senior Research Scientist)
<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

²**Olha Vasylenko**
<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

¹*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

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

SELECTION OF INDICATORS FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF SWARMS OF STRIKING UNMANNED AERIAL VEHICLES TO DEFEAT NON-STATIONARY GROUP TARGETS

The experience of the Russian-Ukrainian war shows that one of the promising areas for improving the effectiveness of combat operations in modern conditions is the transition to group (swarm) use of unmanned systems for reconnaissance and strike missions. In view of this, the article is devoted to solving an urgent scientific task, which is to select indicators for assessing the effectiveness of the use of swarms of striking unmanned aerial vehicles to defeat non-stationary group targets.

The publication highlights the tasks of swarms of attack UAVs, which are divided into combat tasks and tasks of supporting (ensuring) combat operations. Each of them needs to be evaluated in order to make informed decisions and adjust strategies for the swarm use of strike UAVs, which will perform a complex of tasks to detect, recognize, and defeat both single objects and non-stationary group targets of the enemy. Such an assessment requires the availability of appropriate performance indicators. In view of this, the article presents the main requirements for such indicators, proposes a variant of the

general classification of efficiency indicators for the use of swarms of attack UAVs with their conditional division into several groups, the main of which are: functional, temporal, spatial, partial, integral, operational, military and economic. Explanations and expected variants of functional dependencies of these indicators and other additional parameters that will affect the effectiveness of the use of swarms of attack UAVs are also provided.

The study used general scientific methods (analysis, comparison), certain provisions of the systemic approach, probability theory and system reliability theory, as well as military-economic analysis. The proposed efficiency indicators can be used in the formation of models for assessing the effectiveness of the use of swarms of attack UAVs.

Keywords: strike unmanned aerial vehicles, swarm, swarm technology, effectiveness of use, efficiency indicators, defeat of non-stationary group targets.

References

1. Kharchenko O. V., Artushyn L. M., Kononov O. A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Zb. nauk. pr. DNDIA*. 2022. № 18 (25). S. 7–13. DOI: 10.54858/dndia.2022-18-1.
2. Mosov S. P. Roinnia droniv viiskovoho pryznachennia: realii ta perspektyvy. *Zb. nauk. pr. Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Nats. un-tu oborony Ukrainy*. 2024. № 1(80). S. 77–86.
3. Horbulin V. P., Mosov S. P. Roi droniv – kulminatsiia dronizatsii voien. *Visn. NAN Ukrainy*. 2024. № 3. S. 3–11.
4. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini. *Rozporiadzhennia KM Ukrainy vid 2.12.2020 № 1556-r*. Red. vid 29.12.2021, pidstava – 1787-2021-r. URL: <http://surl.li/lhdyyf>. (data zvernennia 10.10.2024)
5. Pro naroshchuvannia spromozhnosti syl oborony: Ukaz Prezidenta Ukrainy vid 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (data zvernennia 10.10.2024)
6. Voienno-istorychni opys rosiisko-ukrainskoi viiny. U 63 Vyp. 18: serpen 2023 r. MO Ukrainy, Aparat Holovnokomanduvacha ZS Ukrainy, HSh ZS Ukrainy ta Tsentri doslidzhen voiennoi istorii ZS Ukrainy. Kyiv. 2023. 204 s.
7. Shovkoshytnyi I. I., Vasylenko O. A. Problemni pytannia roiovoho zastosuvannia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ. Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. *Nauk. zhurn. Nats. un-tu oborony Ukrainy*. Kyiv. 2023. T. 48. № 3. S. 27–34.
8. Husak Yu. A., Vasylenko O. A. Klasteryzatsiia ta klasyfikatsiia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi neironnykh merezh. *Povitriana mits Ukrainy*. 2024. 1 (6). S. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-141-152>.
9. Osnashchenyi shtuchnym intelektom ta dolaiya REB: yak pratsiuie novyi ukrainskyi dron. URL: <http://surl.li/oivqnx2> (data zvernennia 10.10.2024)
10. V Ukraini rozrobliaiut tekhnologiiu “roiui droniv”. URL: <http://surl.li/fgtlwn> (data zvernennia 10.10.2024)
11. Vasylenko O. A. Zastosuvannia roiv udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ pidrozdilamy zbroinykh syl providnykh derzhav svitu. *Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom*. 2024. Pp. 118–121. URL: <http://surl.li/cnmoze>
12. Iaroshenko Ya. V., Herasymenko V. V., Korotin S. M., Martyniuk O. P. Klasyfikatsiia zavdan spilnogo boiovoho poriadku pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii v operatsiakh. *Povitriana mits Ukrainy*. IA ta PPO NUOU. 2021. № 1. S. 41–46.
13. Romanchenko I. S., Zahorka O. M., Butenko S. H., Deineha O. V. Teoriia i praktyka borotby z maloroznimymy nyzkolitnymy tsiliamy (otsinka mozhyvosti, tendentsii rozvytku zasobiv protypovitrianoi oborony). *Monohr. Zhytomyr: «Polissia»*, 2011. 344 s.
14. Shustov L. N. Kompleksy radyoelektronnoi borby avyatsy vooruzhennykh syl y ykh ekspluatatsiia / L. N. Shustov, Y. N. Honcharov. Moskva: VVYA, 1980. 475 s.
15. Komysarov Yu. A. Osnovy radyoelektronnoho protyvodeistviia v VVS / Yu. A. Komysarov, P. A. Lymonov, K. K. Polianskyi y dr. Kyev: KVYAU VVS, 1970. 474 s.
16. Matiushchenko, O. H., Trystan, A. V. Hrupove zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u misiakh z poshuku ta vplyvu na nazemnyi obiekt. *Povitriana mits Ukrainy*. 2021. 1(1). 94–96. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-94-96>
17. Koval V. V., Artiushyn L. M., Semon B. Y., Lobanov A. A., Herasymenko V. V. Pidkhoty do formuluvannia stratehii upravlinnia spilnymy boiovymy poriadkamy pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii. *Nauka i oborona*. 2021. № 4. S. 34–43.
18. Artiushyn L. M., Lobanov A. A., Herasymenko V. V. Matematychna model pobudovy boiovoho poriadku spilnoi aviatsiinoi hrupy pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*. 2021. № 2 (41). S. 23–30. DOI: 10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30.
19. Puleko I. V., Andriev O. V., Dubyna O. F., Chumakevych A. S. Model rukhu bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi aliebray dualnykh kvaternioniv. *Zhytomyrskyi viisk. in-t im. S. P. Korolova. Problemy stvorennia, vyprovovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*. 2022. Vyp. 23. S. 52–61.
20. Mazhara I. P., Tymochko O. I. Model protsesu upravlinnia povitrianykh rukhom na osnovi neironnykh nechitkykh merezh. *Nauka i tekhnika PS ZS Ukrainy*. 2021. № 2 (43). S. 61–65.
21. Samoilenko O. V., Bohoslavets S. O., Steshenko P. M., Nausenko B. Yu. Osoblyvosti keruvannia spilnymy boiovymy poriadkamy bezpilotnykh i pilotovanykh litalnykh aparativ. *Kyiv: Derzh. nauk.-dosl. in-t aviatsii*, 2021. Vyp. 17 (24). S. 45–49.
22. Martyniuk O. R. Model uzgodzhenoho rukhu hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*. 2016. № 1. S. 78–81.
23. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan, Muhammad Shafiq. Motion planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. *Aeronautics - New Advances*. 2022. 244 s. URL: <https://cutt.ly/bwvukUH7>. (data zvernennia: 17.09.2024).
24. Abduraimov T. Z. Alhorytm hlybynnoho analizu danykh dlia zadachi klasyfikatsii na osnovi shtuchnoho bdzholynoho roiui. *Mahist. Dys. ... 123*. Kyiv. NTU Ukrainy “Kyivskyi politekhnichnyi instytut im. Ihoria Sikorskoho”. 2020. 107 s.
25. Berezhnyi A. O. Metody ta informatsiina tekhnologiiia avtomatyzovanoho planuvannia marshrutiv polotiv bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia pidvyshchennia efektyvnosti poshuku obiektiv. *Dys. ... kand. tekhn. nauk*. 05.13.06. Kharkiv. KhNUPS. 2020. 192 s.
26. Sakhopotynov H. A., Syrkin Y. S. Problemy praktycheskoho prymerennia roevoho yntellekta y postroyeniye ustoiyvnykh upravliaemykh hrupp robotov. URL: <https://cutt.ly/0wvujXN3>. (data zvernennia: 10.09.2024).
27. Pashchenko T. P., Mykus S. A., Solonnikov V. H. ta in. Metody modeliuvannia boiovykh dii viisk (syl). *navch. posib*. Kyiv: NUOU im. Ivana Cherniakhovskoho, 2021. 272 s.
28. Achkasov A. Ye., Lushkin V. A., Okhrimenko V. M., Voronkova T. B. Teoriia system i systemnyi analiz: navch. posib. *Kharkiv: KhNUMH*, 2014. 167 s.
29. Mesarovykh M., Mako D., Takakura Y. *Teoriia yerarkhycheskykh mnohourovnevnykh system*. Moskva: Myr, 1973. 312 s.
30. Zhurovskyi M. Z. Systemnyi analiz. *Problemy, metodolohiia, prylozheniia*. *Monohr. Yn-t prykladnoho systemnoho analyza NAN Ukrainy*. [2-e yzd., pererab. y dop.]. Kyev: Nauk. dumka, 2011. 726 s.
31. Maizer Kh., Eidzhyn N., Troll R. *Yssledovanye operatsyi*. V 2-kh t. Pod red. Dzh. Moudera, S. Elmahraby. Moskva: Myr, 1981. T. 1. 712 s.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-73-79

УДК 159.91:355(477)

Медведєв Володимир Костянтинович (кандидат військових наук, професор)

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

Короп Сергій Вікторович

<https://orcid.org/0009-0005-3696-0382>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОПЕРАЦІЙНО-ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА БЕЗПІЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ (І КЛАСУ)

В статті викладені основні інформаційні моделі функціонування системи “оператор-машина-середовище”, на основі аналізу психологічних та психофізіологічних особливостей інформаційних процесів та операційно-інструментальної діяльності операторів безпілотної авіаційних комплексів (далі – БпАК) сформовано типовий перелік професійно важливих якостей (далі – ПВЯ) фахівців операторського профілю, емпіричними методами визначено та проведено ранжування ПВЯ операторів безпілотної літальних апаратів (далі – БпЛА) мультироторного типу (І класу). Проведене дослідження дозволяє в подальшому сформулювати психодіагностичний інструментарій з метою якісного відбору фахівців на посади операторів БпАК, зниження часу та ресурсів на їх підготовку, підвищення надійності та ефективності військово-професійної діяльності спеціалістів безпілотної системи.

Ключові слова: оператор, професійно важливі якості, інформаційна модель, психофізіологічні особливості, безпілотний авіаційний комплекс.

Вступ

Розвиток безпілотної технології у військовій сфері спрямований на зменшення або повну заміну людської участі у виконанні окремих завдань військового характеру. Проте, навіть за умов активного впровадження роботизованих систем, людина-оператор продовжує бути ключовою ланкою у їхньому функціонуванні. Як і в багатьох операторських професіях “людський фактор” в безпілотної системі відіграє провідну роль і ціна помилки оператора може бути занадто високою – призвести до провалу виконання завдання, втрати техніки та загибелі людей. Статистика показує, що близько 20% відмов технічних систем БпЛА безпосередньо або побічно пов’язані з помилками операторів, але більш глибокий аналіз аварійності дає вищі показники. Деякі джерела біля 50% невдалих польотів БпЛА пов’язують з “непрямим людським фактором”, коли найбільш уразливою ланкою при виникненні позаштатної ситуації в польоті або аварії є безпосередньо прийняття рішення та управління БпЛА оператором [1].

Широке використання компактних, відносно доступних за вартістю та портативних мультироторних БпЛА І класу (згідно національного стандарту України ДСТУ В 7371:2020) [3] набуло популярності у військовій сфері завдяки їх універсальності та технологічній можливості до самостійного виробництва в умовах “снарядного голоду”. БпЛА мультироторного типу

чудово підходять для військових завдань – від виконання спостережень та знищення ворога на коротких дистанціях до проведення дистанційного мінування, перехоплення повітряних цілей, виконання ретрансляційних чи логістичних функцій тощо. Важливою особливістю цих БпЛА є те, що організація робочого місця оператора істотно відрізняється від більш масивних станцій наземного керування безпілотників вищих класів. Це робить БпАК І класу більш мобільним та живучим, але все ж таки висуває високі вимоги до професійної компетентності, психологічних та психофізіологічних якостей оператора.

В інженерній психології приділяється все більше уваги дослідженням інформаційних моделей функціонування операторських систем та психодіагностичним методам, які дозволяють визначати професійно важливі якості операторів [4]. Для розробки відповідного психодіагностичного інструментарію необхідно проведення аналізу психологічних та психофізіологічних особливостей інформаційних процесів та операційно-інструментальної діяльності операторів БпАК. Аналіз особливостей дозволить виділити з типового переліку ПВЯ ті, які властиві саме операторам мультироторних БпЛА, що дозволить організувати якісний відбір фахівців на посади операторів, знизить час та ресурси на їх підготовку, підвищить надійність та ефективність роботи спеціалістів безпілотної системи.

Метою цієї статті є аналіз наукових джерел для

систематизації інформаційних моделей функціонування систем “оператор-машина-середовище”, формування типового переліку професійно важливих якостей операторів, визначення ПВЯ операторів БпАК мультироторного типу емпіричними методами і їх ранжування.

Матеріали та методи

У ході дослідження використовувались загальнонаукові методи (аналіз наукових джерел, узагальнення), методи дослідження інженерної психології (моделювання, експертних оцінок, спостереження, опитування). Статистичний аналіз даних здійснювався методами статистики за допомогою пакету аналізу даних програми Excel.

Результати

Аналіз наукових публікацій, в яких було викладено проблему “людського чинника” в операторській професійній діяльності, дозволяє розглядати його через функціонування системи “оператор-машина-середовище” (далі – СОМС) [5].

В результаті досліджень психологічних та психофізіологічних особливостей спеціалістів-операторів, які провели українські та закордонні вчені В. Бодров, В. Кальниш, О. Коқун, М. Корольчук, А. Леонова, Г. Ложкін, Б. Ломов, В. Макаренко, О. Малхазов, В. Осьодло, К. Платонов, В. Пономаренко, А. Скрипеч, В. Шадріков, А. Швець, визначено основні моделі інформаційних процесів в СОМС та виділено комплекси професійних якостей, індивідуально-типологічних властивостей, які визначають надійність “операторської” складової системи [6].

Система в загальній теорії систем розуміється як сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих між собою підсистем, елементів, призначена для вирішення єдиного завдання. Класифікація СОМС визначається на основі чотирьох груп ознак: цільового призначення системи, характеристик людської ланки, типу і структури машинної ланки, типу взаємодії компонентів системи (людини і машини). Виходячи з цього, система “оператор-БпЛА” в подальшому розглядається як керуюча інструментальна моносистема безперервної взаємодії. При цьому СОМС має певні загальні властивості – динамічність, цілеспрямованість, адаптивність, самоорганізацію. Інтегральною оцінкою СОМС є її ефективність. Спираючись на методи моделювання інженерної психології (Б. Ломов) та кібернетики (Н. Вінер) можливо представити наступну модель організації управління та взаємодії в СОМС (рис. 1) [7].

Дана модель має важливе значення для розуміння психофізіологічних особливостей діяльності оператора. На “вході” людини-оператора є рецептори, які перетворюють енергію зовнішнього впливу на нервові імпульси. У центральній нервовій системі відбувається порівняння сигналів, що надійшли, з деякими еталонними, збереженими в пам'яті, і відбувається ухвалення рішення щодо управління, яке здійснюється на основі певних операційних навичок. Ефектори здійснюють зворотне

перетворення енергії імпульсів в енергію руху і через органи управління керують об'єктом управління, стан якого відображається на засобах відображення інформації (далі – ЗВІ). Згідно досліджень М. Бернштейна, так проходить один цикл керування, що може відбуватися за доли секунди, та за допомогою якого складається динамічне, циклічне і безперервне “рефлекторне коло” діяльності оператора [8]. Дана структура співвідноситься з “теорією функціональних систем”, що розроблена П. Анохіним, та конструє модель цілісних актів поведінки (в т.ч. оператора) в найбільш інтегрованому вигляді, як замкнутої складної інформаційної системи взаємозв'язаної послідовності операцій і дій, які регулюються цілями, їх результатами і підпорядковані основній кінцевій меті [9].

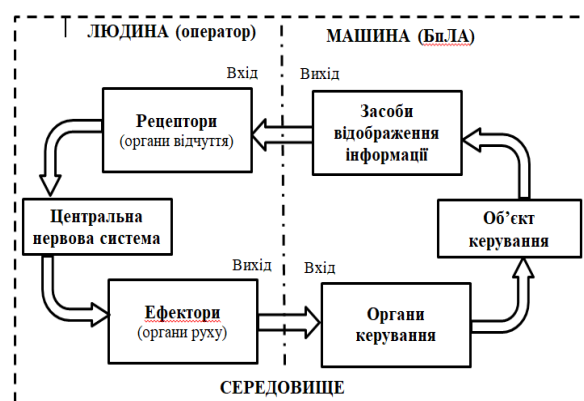


Рисунок 1. Модель управління та взаємодії в системі “оператор-машина-середовище”

Оператор БпЛА віддалений від об'єкта управління, взаємодія між ним і БпЛА опосередковується численними інформаційними системами, які подають інформацію про стан БпЛА в кожний конкретний момент польоту. Відтак він здійснює управління не фізичним об'єктом як таким, а його інформаційною моделлю, що формується в процесі когнітивної діяльності оператора (рис. 2) [1].

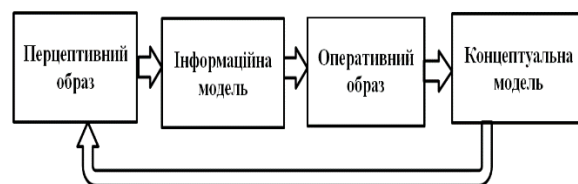


Рисунок 2. Модель когнітивної діяльності оператора в СОМС

“Перцептивний образ” – це цілісне чуттєве відображення реальності, сформоване в результаті сенсорного сприйняття навколишнього середовища. Він є основою для подальшої когнітивної обробки інформації, але містить лише поточну інформацію про стан середовища та об'єктів у ньому.

В результаті обробки інформації в процесі активної цілеспрямованої діяльності оператор формує “інформаційну модель”, яка забезпечує

трансформацію загальних знань про закономірності процесів і явищ у конкретні знання для управління системою. Кожен елемент “інформаційної моделі” активізує в свідомості людини цілий комплекс функціонально пов’язаних елементів, що здебільшого відповідають розв’язанню конкретної задачі. Для технічних ланок існує жорстка залежність між вхідними і вихідними сигналами, що визначається передавальною функцією. Передавальна ж функція ланки людини може змінюватися залежно від поставленої задачі та умов роботи системи. Завдяки оперативному налаштуванню “інформаційна модель” у свідомості оператора відображається у вигляді “оперативного образу”, адекватного поставленій перед ним задачі.

У сучасних системах управління технікою оператор приймає рішення та діє на основі більш обширної інформації, ніж та, яку він отримує з “інформаційної моделі”. На основі отриманих раніше знань та досвіду роботи оператор заздалегідь має певний обсяг додаткових відомостей про стан системи порівняно з тими, що відображені в “інформаційній моделі”. Дані, отримані людиною-оператором з інформаційної моделі, слугують фундаментом для формування “концептуальної моделі”, яка обумовлює діяльність оператора в системі управління.

Таким чином, “інформаційна модель” визначає лише частину змісту “концептуальної моделі”. Але оскільки ця частина є основною, прийнято вважати, що “інформаційна модель” слугує основою для формування “концептуальної моделі”. Слід зазначити принципову відмінність між поняттями “інформаційної” та “концептуальної” моделі. “Інформаційна модель” визначає матеріальну форму, в якій виражена інформація, а “концептуальна модель” – уявлення, що виникають у свідомості оператора під впливом цієї інформації. На основі “концептуальної моделі” людина-оператор приймає рішення про відповідний управлінський вплив на систему. Проте перед реалізацією цього рішення оператор зазвичай подумки “програє” на “інформаційній моделі” результат обраного впливу на систему і лише, задовольнившись ними, здійснює цей вплив.

Оператор може також відхилити обраний спосіб дії. У таких випадках він по-іншому оцінює “інформаційну модель”, залучаючи для цього досвід і додаткові відомості, відомі йому, і створює нову “концептуальну модель”, з якої впливає інший спосіб дії. Цей спосіб знову перевіряється і реалізується тільки в разі, якщо він задовольняє оператора. “Концептуальна модель” може змінюватися і у зв’язку зі зміною “інформаційної моделі” в процесі роботи системи, отриманням якихось додаткових даних безпосередньо від самого керованого об’єкта [10].

Таким чином, “інформаційна модель” створює своєрідне “інформаційне поле”, на якому оператор, “програючи” різні управлінські дії, вибирає оптимальні. Тому ця модель стає для оператора не лише засобом відображення стану системи, але й

об’єктом його цілеспрямованої діяльності. Культура формування оператором інформаційних моделей управління реальними об’єктами є одним із головних прикладних питань практичної психології систем “людина-техніка”, адже в більшості випадків внаслідок педагогічних прорахунків вона відбувається несвідомо, з набуттям досвіду після багатьох помилок. Свідоме, активне та цілеспрямоване формування адекватної ситуації, сутісної та оперативної інформаційної моделі перед виконанням бойового (навчального) завдання дозволяє оператору виходити на рівень прогнозування, екстраполяції, передбачення, антиципації, моделювання і досягати високого рівня майстерності та професіоналізму. З досвіду експертів, відтворюючи тріаду “ціль-діяльність-результат”, оператор БПЛА перед виконанням завдання повинен проаналізувати “інформаційне поле”: відстань до цілі, рельєф місцевості, погодні умови, опорні точки прив’язки, тип корисного (бойового) навантаження і його вплив на керування, дальність, швидкість, час польоту, дію РЕБ ворога та своїх військ, безпеку та фактори ризику тощо. В ході польоту оператор має бути готовим до появи будь-яких нових факторів, що впливають на виконання завдання та динамічно змінюють його “інформаційну модель”.

Виходячи з наведеного вище, можливо сформувати найбільш суттєві психологічні принципи, за якими повинна будуватися модель:

за змістом інформаційні моделі повинні адекватно відображати об’єкти управління та навколишнє середовище;

за формою та композицією повинні відповідати задачам і можливостям оператора у керуванні об’єктом;

мають відображати найбільш суттєві з погляду управління відомості і бути вільними від другорядних деталей, що відволікають оператора;

повинні представляти інформацію у попередньо відібраному та сконцентрованому вигляді, тим самим розвантажуючи оператора від виконання зайвих перцептивних і мисленневих операцій;

повинні мати надлишковість, що забезпечить вищу оперативність і надійність передачі інформації [11].

Оператор БПЛА постійно перебуває в ситуації інформаційного перевантаження. Його діяльності властива висока інтенсивність збирання інформації, яка потребує відповідних сенсорних і моторних реакцій. Згідно теорії інформаційних систем, взаємодія оператора БПЛА з інформаційним простором проводиться у такій структурі: 1) етап збирання й перекодування інформації; 2) етап переробки інформації; 3) етап прийняття рішення; 4) етап виконавських впливів оператора (рис.3) [1].

Інакше кажучи, на першому етапі відбувається цілеспрямований пошук, виокремлення з загального інформаційного потоку сигналів, які необхідні оператору для прийняття рішення. На другому етапі оператор зіставляє дані, що отримуються з засобів інтерфейсу (екран, FPV-

окуляри), з сформованою динамічною “інформаційною моделлю”. Третій етап характеризується відпрацюванням рішення на необхідні дії (в тому числі з врахуванням досвіду), тобто на “виході” оператора з’являється якісно нова інформація, якої не було на “вході”. На четвертому етапі оператор реалізує рішення, прийняте на основі сприйнятої та опрацьованої інформації, шляхом операцій з органами керування БПЛА (“флай-стіками”). Функція корегування діяльності через зворотній зв’язок “рефлекторного кола” також присутня в даній моделі, так як керування мультироторним дроном (особливо FPV), що відбувається за допомогою “великих” пальців або “щипкового хвату” (вказівних і великих пальців) обох рук, потребує постійної операційно-моторної маніпуляції.

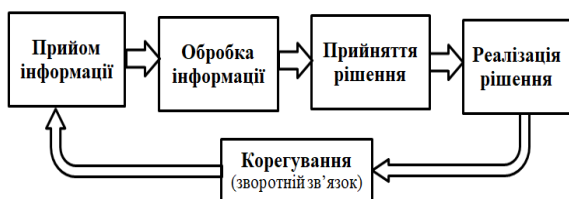


Рисунок 3. Модель взаємодії оператора з інформаційним простором

Від точності і своєчасності прийому інформації авіаційним оператором, надійності її збереження й відтворення, ефективності її переробки зрештою залежить швидкість, точність і надійність усієї системи “людина-машина” [1].

Відтак, циркуляція і переробка інформації в діяльності оператора мають фундаментальне значення, так як обов’язково повинні включати в себе “випереджаюче відображення”, досліджене в наукових працях П. Анохіна та М. Бернштейна.

У дослідженні діяльності людини найбільш повну реалізацію методологія системного підходу одержала в теорії системогенезу діяльності В. Шадрікова, який розглядає загальні закономірності формування психологічної системи діяльності, як сукупність психічних властивостей і якостей у своїй цілісності і єдності. Вона включає основні функціональні блоки: мотиви, цілі і програму діяльності; інформаційну основу діяльності; ухвалення рішень і пізнавальні процеси; психомоторні процеси і робочі рухи; професійно важливі якості (далі – ПВЯ) [12].

У психологічній системі операційно-інструментальної діяльності оператора БпАК особливу роль відіграють ПВЯ, які є внутрішніми характеристиками людини-оператора та відображають зовнішні професійні вимоги до фахівця. Дані якості становлять основу для ефективного виконання діяльності в технічних системах “оператор-машина”. У ПВЯ проявляються ключові компоненти психічної та фізіологічної структури особистості, які визначають її психологічні особливості та здібності: ціннісно-мотиваційні, когнітивні, емоційно-вольові, психомоторні, сенсорно-перцептивні тощо [13].

Успішність професійної діяльності оператора залежить від того, наскільки ці якості розвинені, а також як вони реалізуються у специфічних умовах військово-професійної діяльності. Комплекс ПВЯ для конкретної діяльності, ступінь їх вираженості та особливості розвитку, обумовлюють ефективність і надійність діяльності людини-оператора. В процесі професіоналізації рівень розвитку ПВЯ стабілізується, а змінність окремих показників знижується, при цьому професійно важливі здібності людини удосконалюються, а їх розвиток безпосередньо залежить від практичного досвіду та специфіки роботи [14].

Аналіз структури ПВЯ операторів показав, що в процесі професіоналізації змінюється кількість та щільність взаємозв’язків між окремими якостями, що свідчить про динамічність їх структури. Виявлено також наявність індивідуальних та тимчасових зв’язків, які можуть змінюватися залежно від етапу професіоналізації. Це свідчить про динамічний характер формування якостей, який тісно пов’язаний зі змінами професійних вимог до діяльності, віковим розвитком особистості та адаптаційними стратегіями поведінки в процесі виконання військово-професійних завдань, що потребує більш детального дослідження.

На думку М. Макаренка, основними індивідуально-типологічними характеристиками є параметри нервових процесів, таких як сила, рухливість, динамічність і лабільність. Ці характеристики є базовими для успішної діяльності оператора і значною мірою визначають її ефективність. Хоча індивідуально-типологічні особливості залишаються відносно стабільними протягом життя, їх роль і значення можуть варіюватися залежно від конкретної професійної сфери. Одна й та сама властивість може мати як позитивні, так і негативні прояви у професійній діяльності [15]. Наприклад, слабкість нервових процесів може призводити до зниження працездатності оператора, але водночас підвищує сенсорну та перцептивну чутливість до деталей.

В результаті проведеного аналізу наукових джерел, було виділено декілька основних підсистем професійно важливих якостей, ступінь розвитку яких, на думку авторів, має оцінюватися у кандидатів на посаду оператора, і які мають бути метою спеціальної та цільової психологічної підготовки операторів БпАК [16].

Сенсорні та перцептивні якості людини-оператора є критично важливими для успішної взаємодії з БпЛА. Вони охоплюють основні сенсорні модальності, адже у оператора БпАК основне навантаження (до 90%) відбувається саме на зорову функцію. Професійний досвід та спеціальна підготовка значно підвищують ефективність сенсорних і перцептивних навичок, а висока сенсорна адаптивність та здатність до спостереження стають необхідними компонентами для професіоналів у системах “людина-машина”.

Важливим аспектом у діяльності оператора БпАК є здатність до швидкого й точного

реагування на зовнішні стимули. Психомоторні реакції оператора залежать від багатьох факторів, серед яких виділяють швидкість і точність сенсорно-моторних реакцій, що визначає ефективність управління технікою [17]. Пульс керування БПЛА передбачає наявність двох “флай-стіків” для безпосередніх високоточних маніпуляцій щодо зміни положення БПЛА в просторі та 10-20 додаткових перемикачів. Згідно спостереження, кількість дрібних моторних рухів пальців обох рук при виконанні польоту на FPV-дроні може складати до 3-5 за секунду. Тренованість “кінестетичної чутливості” та психомоторних реакцій, формування вмін та навичок керування на рівні “операціональних автоматизмів” є важливим чинником, який значною мірою впливає на точність операційно-інструментальної діяльності та якість виконання завдань оператором БПЛАК.

Мнемічні властивості також мають значний вплив на ефективність діяльності оператора БПЛАК. Обсяг пам'яті, швидкість запам'ятовування та відтворення, а також точність збереження інформації є ключовими для успішної роботи. Взаємодія між пам'яттю та іншими когнітивними процесами забезпечує високу якість виконання завдань, що вимагають оперативного прийняття рішень на основі отриманої з засобів інтерфейсу (екран або FPV-окуляри) інформації.

Здатність до уяви, зокрема відтворююча уява та екстраполяція образів, є професійно важливими якостями, які забезпечують оператору можливість прогнозувати розвиток ситуацій і приймати ефективні рішення в складних умовах. Вивчення цих факторів вимагає подальших досліджень, тому що професійна антиципаційна спроможність є важливою компетенцією для операторів.

Когнітивні процеси також мають велике значення для оператора, як у контексті творчого, так і оперативного мислення. Вміння приймати швидкі та ефективні рішення є необхідною умовою успішної професійної діяльності, особливо в умовах високої технічної складності, невизначеності та обмеженого часу [18].

Не менш важливими є вольові якості оператора, такі як цілеспрямованість, наполегливість, рішучість та стресостійкість. Вони забезпечують стійкість до впливу факторів бойового стресу, а також здатність до ефективної саморегуляції у процесі виконання завдань. Витривалість, самоконтроль і здатність до відновлення є особливо важливими в умовах тривалої роботи, що вимагає високої концентрації уваги та зусиль.

Експертне оцінювання є одним із способів отримання та використання знань фахівців про предметну область, в основу якого покладено ранжування [19]. З метою виділення професійно важливих якостей операторів БПЛА мультироторного типу проведення експертної оцінки було запрошено 19 експертів у віці від 20 до 47 років. Склад експертної групи: військовослужбовці – фахівці БПЛА мультироторного типу (FPV) з досвідом від 0,5 до 3 років, з них: 5 військовослужбовців займаються підготовкою спеціалістів в сфері БПЛА (в якості інструктора або викладача), 13 – брали участь у бойових діях в якості оператора (пілота) БПЛА. Згідно методики одночасного ранжування факторів експертам було запропоновано проранжувати 10 професійних та особистісних якостей оператора БПЛАК, за ступенем їх впливу на військово-професійну діяльність (найважливіший чинник одержує ранг 1, менш важливий – ранг 2 тощо). За результатами оцінювання було складено матрицю ранжування, проведено однофакторний дисперсний аналіз та перевірено узгодженість думок експертів. Була виявлена низька узгодженість оцінок з іншими експертами у 4 військовослужбовців, що свідчить про низьку залученість експертів в процес оцінювання, внаслідок незадовільної мотивації або недостатнього розуміння важливості завдання. Тому їх оцінки в подальшій обробці не враховувались.

Результати ранжування професійно важливих якостей оператора БПЛАК мультироторного типу, виходячи з оцінок експертів, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати ранжування професійно важливих якостей оператора БПЛАК

Ранг	ПВЯ оператора БПЛАК мультироторного типу	Середнє	Дисперсія
1	Здатність приймати та реалізовувати рішення в екстремальних умовах, стресостійкість (адаптивність)	4,1	6,8
2	Стійкість до втоми (витривалість) та здатність швидко відновлюватися	4,2	4,7
3	Здатність до навчання, гнучкість мислення, пошук нестандартних рішень (креативність)	4,8	4,7
4	Високий рівень та точність сенсомоторних (рухових) реакцій в будь-якій складній ситуації	5,2	9,2
5	Зібраність, концентрація, відповідальність та дисциплінованість	5,2	11,825
6	Наявність оперативного та образного мислення, прогнозування, інтуїції, передбачення (антиципації)	5,8	4,7
7	Стійкість та швидкість переключення уваги, розвинена зорова та рухова пам'ять (образна, логічна)	6	11,5
8	Орієнтація в просторі, просторове відчуття, стійкий вестибулярний апарат	6,5	15,75
9	Мотивація до професійної діяльності (розвитку)	6,5	10,875
10	Комунікативні якості (здатність до роботи в групі), моральна нормативність	6,7	3,45

Обговорення

Проведений аналіз експертних оцінок дозволив ідентифікувати ключові психологічні та психофізіологічні показники (ПВЯ), що можуть бути використані для оцінки рівня професійно-психологічної придатності та формування критеріїв відбору операторів БпАК мультироторного типу. Перспективою подальших досліджень вважається формування діагностичного інструментарію з метою ретельного первинного відбору і подальшого систематичного моніторингу функціонального стану операторів БпАК. Такий підхід спрямований на збереження фізичного та психічного здоров'я операторів, забезпечення їхньої високої боєздатності, підвищення надійності при виконанні завдань у бойових умовах.

Висновки

Таким чином, мета статті вважається досягнутою. Проведений аналіз наукових джерел дозволив сформувати 3 моделі функціонування систем “оператор-машина-середовище”, а саме: модель управління та взаємодії в СОМС, модель когнітивної діяльності оператора в СОМС, модель взаємодії оператора з інформаційним простором.

Формування типового переліку професійно важливих якостей операторів (сенсорно-перцептивних, психомоторних, атенційних, мнемічних, когнітивних, вольових тощо) дозволило за допомогою емпіричних методів дослідження і ранжування виділити ПВЯ, професійно необхідні для операторів БпАК мультироторного типу.

Проведене дослідження дозволяє в подальшому сформувати психодіагностичний інструментарій з метою якісного відбору фахівців на посади операторів БпАК, зниження часу та ресурсів на їх підготовку, підвищення надійності та ефективності військово-професійної діяльності спеціалістів безпілотної системи.

Список використаних джерел

1. Скрипеч А.В. Основи авіаційної інженерної психології. Київ : НАУ, 2002. 532 с.
2. Bohush H.L., Tymchushyn T.P., Kalnysh V.V., Trinka I.S., Pashkovskyi S.M., Koval N.V. Express assessment of the physical condition of operators of unmanned aircraft systems. *Am J Biomed Sci Res.* 2024. Vol. 22. Iss. 1. P. 199–201.
3. ДСТУ В 7371:2020. Техніка авіаційна державної авіації. Апарати літальні безпілотні. Основні терміни та

визначення понять. Класифікація. Чинний від 01.07.2021. Київ : Технічний комітет стандартизації “Стандартизація продукції оборонного призначення” (ТК 176), 2020.

4. Корольчук М.С., Крайнюк В.М. Теорія і практика професійного психологічного відбору : навч. посіб. Київ : Ніка-Центр, 2006. 536 с.

5. Скрипеч А.В., Буров О.Ю., Павлов В.В. Інженерна психологія, ергономіка та людський чинник в авіації : підручник / за заг. ред. проф. А.В. Скрипця. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2010. 696 с.

6. Maltsev O.V., Kalnysh V.V., Shvets A.V. Features of the influence of working conditions on psychophysiological functions of unmanned aircraft systems operators. *Фізіол. журн.* 2024. Vol. 70. Iss. 2. P. 12–25.

7. Трофімов Ю.Л. Інженерна психологія. Київ : Либідь, 2002. 264 с.

8. Кокур О.М. Психофізіологія : навч. посіб. Київ: Центр навчальної літератури, 2006. 184 с.

9. Корольчук М.С. Психофізіологія діяльності : підручник. Київ : Ельга, Ніка-Центр, 2003. 395 с.

10. Ложкін Г.В. Психологічне супроводження військовослужбовців у діяльності за екстремальних умов. Київ : МОУ, 2003. 218 с.

11. Семак О.О. Основи інженерної психології : навч.-метод. посіб. Івано-Франківськ : Плай, 2006. 106 с.

12. Диференційна психологія : підручник / за заг. ред. С.Д. Максименка. Київ : ВД “Слово”, 2013. 496 с.

13. Пасічник В.І., Афанасенко В.С. Особливості професійного відбору кандидатів на посади операторів безпілотної авіаційних комплексів тактичних класів. *Честь і закон.* 2019. № 4 (71). С. 126–136.

14. Ударцева Т.Є. Доцільність проведення професійного добору операторів безпілотними літальними апаратами. Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 1 (45). С. 186–189.

15. Макаренко М.В. Основи професійного відбору військових спеціалістів та методики вивчення індивідуальних психофізіологічних відмінностей між людьми. Київ : Ін-т фізіології ім. О.О. Богомольця НАН України, 2006. 395 с.

16. Кальниш В.В., Швець А.В. Працездатність та надійність напруженої операторської діяльності: механізми формування та методи оцінки : монографія. Вінниця : ПП Балюк І.Б., 2019. 352 с.

17. Клименко В.В. Механізми психомоторики людини. Київ : Шкільний світ, 1997. 192 с.

18. Кокур О.М. Психологія професійного становлення сучасного фахівця : монографія. Київ : ДП “Інформ.-аналіт. агентство”, 2012. 200 с.

19. Москальов І.О., Лисенко Д.П. Застосування методів математичної статистики у психолого-педагогічних дослідженнях : навч. посіб. Київ : НУОУ, 2023. 189 с.

Volodymyr Medvediev (Candidate of Military Sciences, Professor)

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

Serhii Korop

<https://orcid.org/0009-0005-3696-0382>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

PSYCHOPHYSIOLOGICAL FEATURES OF AN OPERATIONAL AND INSTRUMENTAL ACTIVITY OF AN OPERATOR OF AN UNMANNED AERIAL SYSTEM OF A MULTIROTOR TYPE (CLASS 1)

The article presents the main informational models of the functioning of the “operator-machine-environment” system. Based on the analysis of psychological and psychophysiological characteristics of informational processes and operational-instrumental activities of unmanned aerial system (UAS) operators, a typical list of professionally important qualities (PIQs) for operator profile specialists has been formulated. Using empirical methods, the PIQs of operators of multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) of class 1 were determined and ranked. The conducted research enables the development of psychodiagnostic tools for high-quality selection of specialists for UAS operator positions, reducing time and resources for their training, and increasing the reliability and efficiency of military-professional activities of unmanned systems specialists.

Keywords: operator, professionally important qualities, informational model, psychophysiological characteristics, unmanned aerial system.

References

1. Skrypets A.V. Osnovy aviatsiynoyi inzhenernoyi psykholohiyi. Kyiv : NAU, 2002. 532 p.
2. Bohush H.L., Tymchushyn T.P., Kalnysh V.V., Trinka I.S., Pashkovskiy S.M., Koval N.V. Express assessment of the physical condition of operators of unmanned aircraft systems. Am J Biomed Sci Res. 2024. Vol. 22. Iss. 1. P. 199–201.
3. DSTU V 7371:2020. Tekhnika aviatsiyny derzhavnoyi aviatsiyi. Aparaty lital'ni bezpilotni. Osnovni termini ta vyznachennya ponyat'. Klasyfikatsiya. Chynnyy vid 01.07.2021. Kyiv : Tekhnichnyy komitet standartyzatsiyi “Standartyzatsiya produktsiyi oboronnoho pryznachennya” (TK 176), 2020.
4. Korol'chuk M.S., Kraynyuk V.M. Teoriya i praktyka profesiynoho psykholohichnoho vidboru : navch. posib. Kyiv : Nika-Tsentr, 2006. 536 p.
5. Skrypets A.V., Burov O.Yu., Pavlov V.V. Inzhenerna psykholohiya, erhohrafika ta lyudskyy chynnyk v aviatsiyi : pidruchnyk / za zah. red. prof. A.V. Skryptsya. Kyiv : Vyd-vo Nats. aviats. un-tu “NAU-druk”, 2010. 696 p.
6. Maltsev O.V., Kalnysh V.V., Shvets A.V. Features of the influence of working conditions on psychophysiological functions of unmanned aircraft systems operators. Fiziol. zhurnal. 2024. Vol. 70. Iss. 2. P. 12–25.
7. Trofimov Yu.L. Inzhenerna psykholohiya. Kyiv : Lybid', 2002. 264 p.
8. Kokun O.M. Psykhofiziolohiya : navch. posib. Kyiv : Tsentr navchal'noyi literatury, 2006. 184 p.
9. Korol'chuk M.S. Psykhofiziolohiya diyal'nosti : pidruchnyk. Kyiv : Elha, Nika-Tsentr, 2003. 395 p.
10. Lozhkin H.V. Psykhologichne suprovodzhennya viys'kovosluzhbovtiv u diyal'nosti za ekstremal'nykh umov. Kyiv : MOU, 2003. 218 p.
11. Semak O.O. Osnovy inzhenernoyi psykholohiyi : navch.-metod. posib. Ivano-Frankivsk : Play, 2006. 106 p.
12. Dyferentsiyna psykholohiya : pidruchnyk / za zah. red. S.D. Maksymenka. Kyiv : VD “Slovo”, 2013. 496 p.
13. Pasichnyk V.I., Afanasenko V.S. Osoblyvosti profesiynoho vidboru kandydativ na posady operatoriv bezpilotnykh aviatsiynykh kompleksiv taktychnykh klasiv. Chest' i zakon. 2019. No. 4 (71). P. 126–136.
14. Udartseva T.Ye. Dotsil'nist' provedennya profesiynoho dobro operatoriv bezpilotnykh lital'nykh aparatamy. Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika. 2016. No. 1 (45). P. 186–189.
15. Makarenko M.V. Osnovy profesiynoho vidboru viys'kovykh spetsialistiv ta metodyky vyvchennya individual'nykh psykhofiziolohichnykh vidminnostey mizh lyud'my. Kyiv : Instytut fiziolohiyi im. O.O. Bohomol'tsya NAN Ukrainy, 2006. 395 p.
16. Kal'nysh V.V., Shvets A.V. Pratsездatnist' ta nadiynist' napruzheno yi operators'koyi diyal'nosti: mekhanizmy formuvannya ta metody otsinky : monohrafiya. Vinnytsya : PP Balyuk I.B., 2019. 352 p.
17. Klymenko V.V. Mekhanizmy psykhomotoryky lyudyny. Kyiv : “Shkil'nyy svit”, 1997. 192 p.
18. Kokun O.M. Psykhologhiya profesiynoho stanovlennya suchasnoho fakhivtsya : monohrafiya. Kyiv : DP “Inform.-analychne ahentstvo”, 2012. 200 p.
19. Moskalyov I.O., Lysenko D.P. Zastosuvannya metodiv matematychnoyi statystyky u psykholohyko-pedahohichnykh doslidzhennyakh : navch. posib. Kyiv : NOOU, 2023. 189 p.

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-80-86

УДК 623.746.-519 : 004.89

Мартинюк Олексій Ростиславович (кандидат технічних наук, доцент)

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

Медведєв Володимир Костянтинівич (кандидат військових наук, професор)

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

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ КОЛЕКТИВНИХ ЗАДАЧ ПРИ ГРУПОВОМУ ЗАСТОСУВАННІ БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

Стаття присвячена висвітленню підходу до формування сукупності задач в безпілотної авіаційній системі з автономною групою безпілотних літальних апаратів. В межах підходу описується інформаційна технологія в мультиагентній системі для самостійного синтезу інтелектуальними агентами колективної задачі, яка виконується певною групою агентів. В межах підходу на етапі підготовки ставиться у відповідність множина основних призначень безпілотних авіаційних систем до множини спроможностей агентів при формуванні простих, складних, інтегральних і мережевих колективних задач, а на етапі застосування – інтелектуальними агентами самостійно синтезується колективна задача для забезпечення максимуму функції корисності безпілотної авіаційної системи.

Стаття буде корисною особам, що приймають рішення на застосування безпілотних авіаційних систем, і дослідникам, які розробляють інноваційні форми та способи застосування безпілотних авіаційних систем.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, колективна задача, мультиагентна система, взаємодія, інформаційна технологія, штучний інтелект.*

Вступ

Аналіз досвіду участі підрозділів Збройних Сил України в російсько-українській війні (РУВ) показує, що застосування безпілотних авіаційних систем (БпАС) дає змогу значно підвищити ефективність вогневого впливу на об'єкти противника. Позитивний досвід вимагає подальшого розвитку безпілотної авіації в Збройних Силах України, напрямком якого визначений Стратегічним оборонним бюлетенем України (Завдання 3.3) [1].

Перехід від поодинокого застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) до їх інтегрованого застосування у різних комбінаціях, дозволить за рахунок поєднання властивостей корисного навантаження окремих БпЛА підвищити загальну функціональність групи.

На теперішній час теоретичні і практичні основи для групового управління розроблені лише для послідовного або одночасного застосування декількох БпЛА. Причому, під групою розуміється сукупність БпЛА, які знаходяться одночасно в деякому районі, без безпосередньої взаємодії між БпЛА. Функціональне ж поєднання БпЛА в колективи для виконання спільних завдань вимагає вирішення наукової проблеми, суть якої полягає в розробці науково-методичного апарату для автономного управління групою БпЛА, що здійснюється на основі взаємодії між БпЛА в повітрі, в умовах динамічного протидіючого середовища.

Задача автономного управління групою виникає при необхідності вирішення деякого завдання спільними зусиллями колективу виконавців, коли результат досягається лише при узгоджених діях всіх учасників колективу. В даній роботі будемо називати таке завдання *колективною задачею (КЗ)*, а підгрупу БпЛА, необхідних для ефективного виконання КЗ, – *колективом*.

У роботах [2-4], як при централізованому так і при децентралізованому управлінні групою, основна увага приділяється питанням взаємодії між учасниками групи при вирішенні сумісної задачі.

При централізованому управлінні задача подається у вигляді наперед спланованої мережевої моделі цільової задачі, а взаємодія організовується органом управління. При управлінні невеликою групою об'єктів (близько десяти) в детермінованому середовищі, при добре організованому контролі функціонування кожного окремого об'єкта, що виключає затримки передачі інформації, централізований спосіб управління дає оптимальний результат.

Проте, при застосуванні БпЛА в умовах активної протидії противника не можна очікувати ні детермінованості середовища, ні відсутності затримок при передачі інформації для здійснення контролю, а збільшення кількості БпЛА в групі унеможливує ефективне централізоване управління. Тому постає питання надання можливості приймати рішення кожному БпЛА, які б забезпечувались розподіленою *системою*

групового управління (СГУ) децентралізованим способом. Рівень автономності групи БпЛА залежить від інтелектуальності СГУ [4], яка забезпечує ефективне функціонування групи починаючи від вирішення проблеми збереження кожного БпЛА на час відсутності каналу управління, закінчуючи забезпеченням автономного координованого планування і виконанням складних динамічних колективних задач.

Задача автономного управління групою БпЛА складається з декількох незалежних підзадач, а саме:

з формування органом управління переліку КЗ, які спроможна виконувати група БпЛА, з визначенням їх пріоритетів;

з формування певної топології (бойового порядку) групи БпЛА в районі відповідальності [5-7];

з прийняття рішення групою БпЛА про участь у виконанні КЗ, що принесуть найбільшу сумарну користь, і узгодженого виконання КЗ у просторі і часі.

Найбільш якісно задачу групового управління дозволяє формалізувати теорія колективної поведінки, яка базується на методах мультиагентних систем (МАС) [8-10].

В термінах МАС кожен БпЛА доцільно подати у якості інтелектуального агента з BDI-архітектурою (Believes-Desires-Intentions, англ. – переконання-бажання-наміри), яку запропонував Братман [8] для формалізації соціальних груп. Агент поміщений в зовнішнє середовище і здатний взаємодіяти з ним (в тому числі і з іншими агентами), здійснюючи автономні раціональні дії для досягнення певної мети.

В роботі [10] показано шлях розвитку агентів від простих рефлексивних до здатних самонавчатися.

Локально взаємодіючи між собою, інтелектуальні агенти створюють так званий колективний інтелект, який здатний до самоорганізації і складної поведінки навіть якщо стратегія поведінки кожного агента досить проста (синергетичний ефект) [2-4].

В зазначених вище роботах описуються різні сторони процесу управління групою, але разом з тим для дослідження перспективного напрямку – групового застосування БпЛА, постає необхідність як у пристосуванні існуючого, так і у розробці нового ефективного методологічного апарату, який би найбільш повно відповідав децентралізованому способу управління групою БпЛА, забезпечував її масштабованість і, у той же час, був би достатньо простим у практичному застосуванні.

Ефективність автономного застосування БпЛА у великій групі напряму залежить від відповідності вибору КЗ до можливостей групи по ресурсам і управлінню, що дасть змогу реалізувати можливості кожного окремого БпЛА з максимальним ефектом для групи. Для цього необхідно мати наперед визначену множину придатних КЗ, з якої можна оперативно вибирати

найбільш відповідну умовам обстановки, що склалися.

Для формування множини придатних КЗ необхідно вирішити дві зустрічні задачі. Перша полягає в декомпозиції основних призначень БпАС, визначених керівними документами. Друга – в синтезі множини можливих колективних задач з елементарних дій БпЛА, які характеризуються властивостями інтелектуальних агентів і тактико-технічними характеристиками БпЛА з корисним навантаженням. Множина придатних КЗ є перетиною множин, сформованих при вирішенні цих задач.

Таким чином метою статті є викладення підходу до формування КЗ для БпАС з групою БпЛА, що базується на методах штучного інтелекту, а саме – мультиагентних систем.

Результати

Розглядається група БпЛА задана множиною $\{UAV\}^N = \{UAV_i | i=1 \dots N\}$. Кожен БпЛА UAV_i спроможний виконувати певну елементарну дію за призначенням a^i (в загальному випадку набір дій $\{a\}_i$) з множини можливих елементарних дій (спроможностей) групи $A = \{a^j | j=1 \dots J\}$ (рис. 1). Серед яких необхідно окремо виділити притаманні всім БпЛА групи вміння визначати своє місцеположення, динамічно планувати власний маршрут руху і підтримувати контакт з локальною групою.

Під локальною групою (колективу або окремого БпЛА) розуміється підгрупа БпЛА, що складається з сусідніх БпЛА в зоні прямої видимості d_{adj} малопотужного прийомопередавача, за допомогою якого здійснюється взаємодія між БпЛА.

Кожен БпЛА UAV_i є (спів)виконавцем задачі g^k з множини всіх можливих $G = \{g^k | k=1 \dots K\}$.

В роботі розрізняються поняття групова задача і колективна. В групі БпЛА завдання окремих БпЛА незалежні, а їх ефект додається при виконанні групової задачі. Виконання же колективної задачі залежить від виконання кожної окремої задачі всіх членів колективу БпЛА.

Задача групи є відображенням множини дій БпЛА на множину підзадач (рис. 1):

$$\{UAV\}^N: A \rightarrow G^N, G^N \subset G$$

В загальному випадку складність групової задачі G^N залежить від досягнутого рівня автономності системи групового управління (СГУ) [4] і складається з підзадач g^k , які виконуються за рахунок дій ієрархії $l=1 \dots L$ БпЛА. Кожен рівень ієрархії l може бути представлений як множиною окремих БпЛА так і їх колективами.

При переході до вищого рівня організації групи, колективні задачі ускладнюються з послідовною інтелектуалізацією від простих до складних, інтегральних і мережових (рис. 2).

Визначення колективних задач

Проста задача (g_l). БпЛА UAV_i здатен виконувати a^j дію і є єдиним виконавцем задачі g_l^k .

$$UAV_i: a_i^j \rightarrow g_l^k, (i=1 \dots N, j=1 \dots J, k=1 \dots K)$$

При застосуванні декількох БпЛА групова задача буде простим поєднанням задач всіх БпЛА

групи, за рахунок поєднання елементарних дій кожного БПЛА.

$$\{UAV\}^N: \bigcup_{i=1}^N a_i^j \rightarrow \bigcup_{i=1}^N g_i^k = G_1^N, (j=1 \dots J, k=1 \dots K).$$

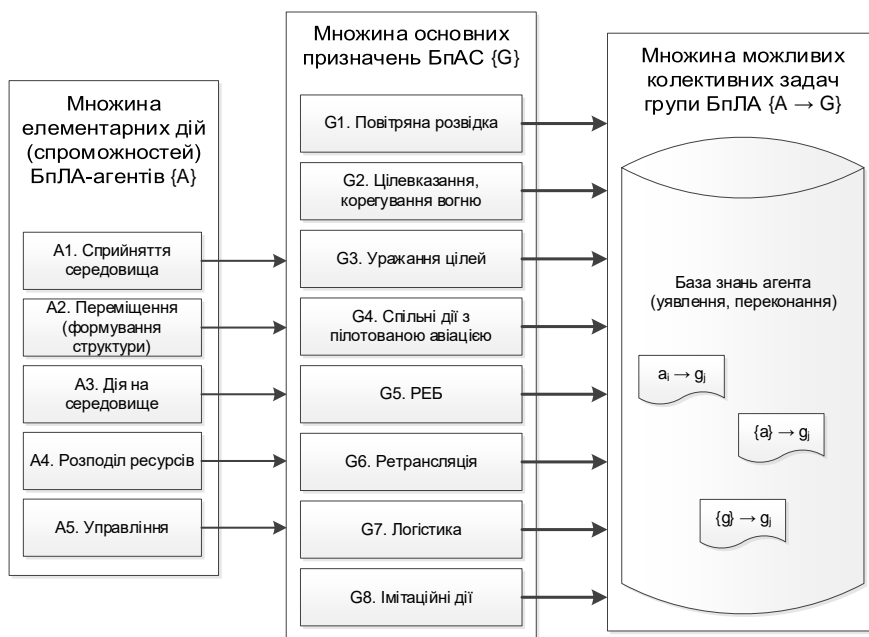


Рисунок 1. Формування множини задач для групи БПЛА

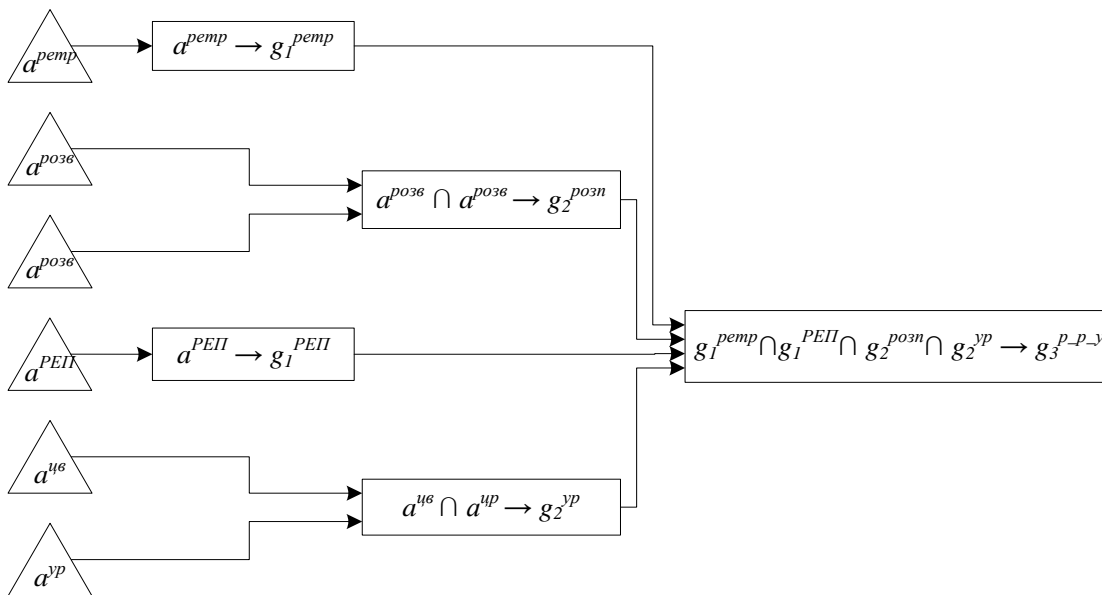


Рисунок 2. Структура інтегральної колективної задачі

Один БПЛА здатен виконати групове завдання самостійно. Кількість учасників в групі залежить від вимог до оперативності і ймовірності виконання завдання (живучості). Залежність ефективності групи від кількості учасників лінійна, синергетичний ефект не спостерігається.

Наприклад, кожен з десяти БПЛА UAV_i незалежно виконує розвідку (дія a^{розв}) території і доставляє розвідувальну інформацію на наземний пункт управління (НПУ) (задача g^{PI}). Група БПЛА {UAV}¹⁰ застосовується для підвищення оперативності розвідки заданої території.

$$\{UAV\}^{10} : 10a^{розв} \rightarrow 10g_1^{PI} = G_1^{10};$$

A={a^{розв} (розвідка)}, G={g^{PI} (доставка

розвідувальної інформації на НПУ)}.

Складна задача (g^k). Для успішного виконання КЗ необхідні спільні дії k-ої підгрупи – колективу з N_k БПЛА. Кожен БПЛА колективу UAV_i (i=1...N_k) виконує певну дію aⁱ ∈ A. При невиконанні однієї з дій aⁱ, що складають КЗ, – складна задача не виконується (g^k = ∅).

$$\{UAV\}^{N_k} : \bigcap_{i=1}^{N_k} a_i^j \rightarrow g_2^k$$

При N_k=1 складна колективна задача є простою.

Групова задача, що включає в себе складні задачі, – задача другого рівня – складається з окремих задач K підгруп БПЛА, причому, кожна дія може виконуватися від одного до m_i БПЛА для

підвищення оперативності чи/або забезпечення живучості:

$$\{UAV\}^N: \cup_{k=1}^K \cap_{i=1}^{N_k} m_i a_i^j \rightarrow \cup_{k=1}^K g_2^k = G_2^N,$$

$$\sum_{k=1}^K N_k = N$$

Приклад. Нехай підгрупа з 2-х БпЛА-розвідників $N_1=2$ виконує розвідку об'єкта (дія $a^{розв}$) сумісно, обмінюючись даними про об'єкт для збільшення ймовірності його розпізнавання (складна колективна задача $g_2^{розн}$), а друга підгрупа уражає наперед задану ціль (складна колективна задача $g_2^{уц}$): $N_2=2$, 1 ударний БпЛА (дія $a^{уц}$) і 1 БпЛА для цілевказання (дія $a^{цв}$).

Задача для групи $N=4$ виявити одну ціль і уразити іншу задану ціль.

$$K=2, N_1=2, N_2=2;$$

$A=\{ a^{розв}$ (розвідка), $a^{цв}$ (цілевказання), $a^{ур}$ (ураження));

$G=\{ g_2^{розн}$ (розпізнавання цілі), $g_2^{уц}$ (ураження цілі);

$$\{UAV^{розв}\}^2: a^{розв} \cap a^{розв} \rightarrow g_2^{розн};$$

$$\{UAV^{ур}, UAV^{цв}\}: a^{ур} \cap a^{цв} \rightarrow g_2^{уц};$$

$$\{UAV\}^4 = \{ \{UAV^{розв}\}^2, UAV^{ур}, UAV^{цв} \};$$

$$\{UAV\}^4: (a^{розв} \cap a^{розв}) \cup (a^{ур} \cap a^{цв}) \rightarrow g_2^{розн} \cup g_2^{уц} = G_2^4.$$

Інтегральна задача (g_3^k) – формується з множини P простих ($N_p=1$) і складних ($N_p>1$) колективних задач:

$$\{UAV\} \sum_{p=1}^P N_p: \cap_{p=1}^P \cap_{i=1}^{N_p} a_i^j \rightarrow g_3^k$$

Групова задача, що включає в себе інтегральні колективні задачі, – задача третього рівня – складається з окремих задач K підгруп БпЛА, причому, аналогічно як і для попереднього випадку, складні задачі можуть виконуватися множиною підгруп – від одної до q_i :

$$\{UAV\}^N: \cup_{k=1}^K \cap_{p=1}^{P_k} q_p \cap_{i=1}^{N_p} m_i a_i^j \rightarrow \cup_{k=1}^K g_3^k = G_3^N$$

За відсутності дублювання ($q_p=1$ і $m_i=1$), при невиконанні хоча б однієї з дій a_i , що складають інтегральну колективну задачу, вона розпадається на окремі прості і складні задачі.

Приклад. Нехай при виконанні завдань розвідувальним ударним комплексом по розпізнаванню цілі, передачу інформації про неї на НПУ і після підтвердження – її ураження ($g_3^{р-у}$) необхідно (Рис. 2):

2 БпЛА-розвідника, що виконують розвідку об'єкта сумісно, обмінюючись даними про об'єкт ($a^{розв}$) для його розпізнавання ($g_2^{розн}$);

1 ударний БпЛА ($a^{ур}$) і 1 БпЛА для цілевказання ($a^{цв}$) – для нанесення удару ($g_2^{уц}$);

1 БпЛА-ретранслятор ($a^{рerp}$) – для передачі інформації на НПУ ($g_1^{рerp}$);

1 БпЛА-РЕБ ($a^{PEП}$) – для радіоелектронного придушення засобів ППО противника ($g_1^{PEП}$).

$$P=4, N=6;$$

$A=\{ a^{розв}$ (розвідка), $a^{цв}$ (цілевказання), $a^{ур}$ (ураження) $a^{рerp}$ (ретрансляція), $a^{PEП}$ (РЕП));

$G=\{ g_1^{рerp}$ (передача інформації на НПУ), $g_1^{PEП}$ (РЕП), $g_2^{розн}$ (розпізнавання цілі), $g_2^{уц}$ (ураження

цілі);

$$\{UAV\}^6 = \{ \{UAV^{розв}\}^2, \{UAV^{ур}, UAV^{цв}\}, \{UAV^{рerp}\}, \{UAV^{PEП}\} \}.$$

$$\{UAV\}^6: (a^{розв} \cap a^{розв}) \cap (a^{цв} \cap a^{ур}) \cap a^{рerp} \cap a^{PEП} \rightarrow g_2^{розн} \cap g_2^{уц} \cap g_1^{рerp} \cap g_1^{PEП} = g_3^{р-у}.$$

Мережева задача (g_4^k) – є сполученням вищеперерахованих колективних задач, але поданим у вигляді мережевого графіку. Така колективна задача може вирішуватись методами теорії розкладів. Вона вимагає високої інтелектуальності від агентів БАС, складної соціальної організації і централізованого контролю [2]. В умовах активної протидії з боку середовища динамічна побудова (корегування) ефективної мережевої моделі потребує подальших досліджень, тому в даній роботі обмежимося розглядом простих, складних і інтегральних КЗ.

Формування групового завдання

Алгоритм дій органу управління під час вироблення рекомендацій щодо застосування групи БпЛА показаний на (рис. 3).

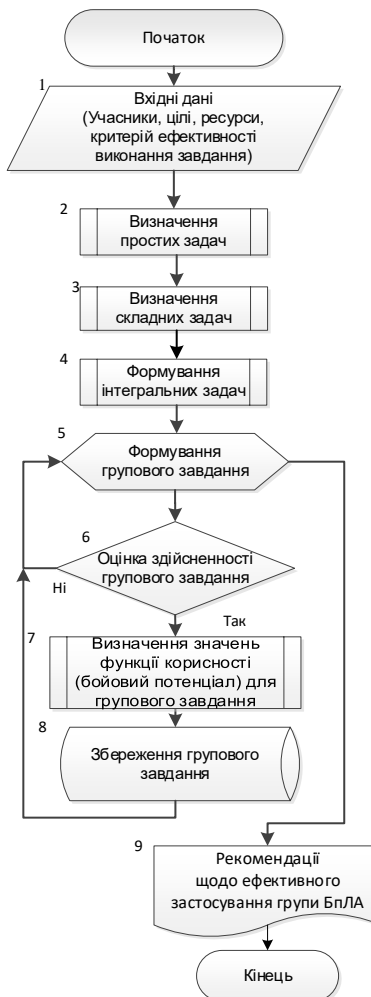


Рисунок 3 – Алгоритм формування групового завдання

Орган управління аналізує призначення БпАС, визначені керівними документами, і спроможності БпЛА, які характеризуються тактико-технічними характеристиками БпЛА і цільового навантаження

(блок 1). Для конкретної операції (бойових дій) з урахуванням БпЛА, що знаходяться на озброєнні, визначаються показники ефективності виконання завдання.

Результатом блоків 2-4 є сформована база знань агентів щодо множини можливих КЗ (рис. 1).

Групове завдання формується шляхом перебору (блок 5) варіантів групового застосування, що складаються з різних наборів простих, складних і інтегральних колективних задач.

В блоці 6 алгоритму здійснюється попередня оцінка групового завдання на основі критерію придатності. У випадку, якщо завдання йому задовольняє, в блоці 7 проводиться прогнозована оцінка важливості виконання даного завдання і значення корисності участі в ньому для БпЛА кожного типу.

В блоці 8 відбувається збереження групового завдання у базі знань з відповідним рангом.

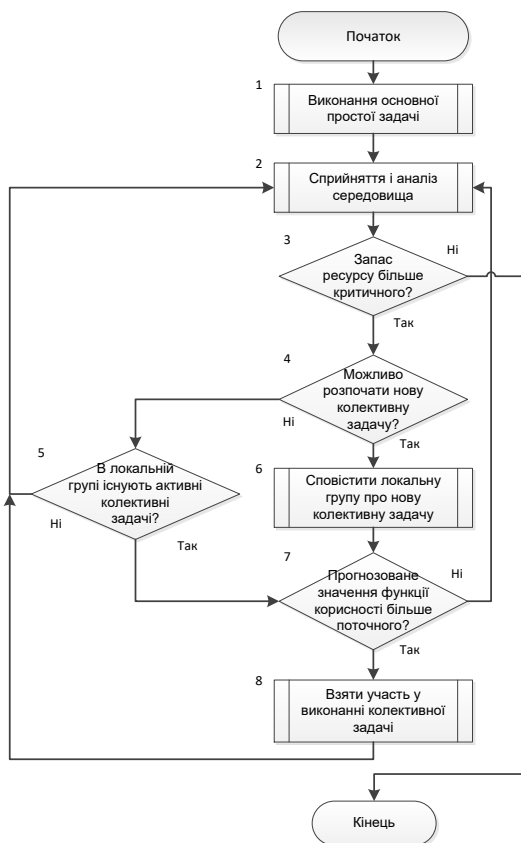


Рисунок 4 – Алгоритм прийняття рішення агентом на участь в колективному завданні

В результаті роботи органу управління формується множина можливих задач для визначеної групи БпЛА у визначеному районі призначення; визначаються необхідні типи БпЛА і їх кількість для виконання КЗ, з визначенням пріоритетів участі в них.

Обговорення

При знаходженні в групі кожен БпЛА-агент приймає рішення на основі інформації, отриманої

від локальної групи, в якому з активних завдань прийняти участь з урахуванням функції власної корисності (цільової функції). Також, кожен БпЛА може сам ініціювати колективну задачу відповідно до інформації про середовище, отриману від власних сенсорів (рис. 4).

Відмітимо, що корисність агента тим більше, чим в складнішій колективній задачі він приймає участь. Корисність групи можна описати в термінах методу бойових потенціалів [11]. Вона нелінійно зростає з ускладненням задач, які спроможна виконати група зі сталим числом учасників:

$$G_1^N < G_2^N < G_3^N < G_4^N, N = const.$$

Для кожного БпЛА функція власної корисності залежить від наявних ресурсів, досягнутого групою рівня автономності і протидії середовища:

$$W^i = f(\{a_i^j\}, t_s, t_d).$$

До ресурсів належать: множина дій (спроможностей) БпЛА $\{a_i^j\}$, час t_s початку участі у виконанні завдання (відстань до цілі) і запас льотного часу t_d (або енергоресурсу) на виконання завдання (від нього залежить ймовірність виконання завдання).

Групові задачі не передаються в автономну групу – групі призначається лише район відповідальності. Завдання група синтезує автономно, в залежності від інформації, отриманої від середовища, формуючи колективи для виконання кожного нового завдання з використанням розробленого мережевого протоколу взаємодії (рис. 5).

Наприклад (рис. 2), БпЛА UAV_i при виконанні дії $a_i^{розв}$ виявив з ймовірністю більше 0,5 наземну мобільну ціль, про що сповіщає свою локальну групу. Кожен БпЛА, що належить до локальної групи і виконує деяку просту задачу g_1 , оцінює власну корисність участі в завданні по розпізнанню виявленого об'єкта $g_2^{розп}$. При формуванні колективу для виконання завдання $g_2^{розп}$ члени локальних груп (безпосереднє оточення) колективу будуть прагнути прийняти участь в виконанні колективної задачі наступного рівня по передачі даної інформації на НПУ $g_3^{репр}$.

При неможливості прийняти участь у виконанні задачі колективу, БпЛА, що належить до локальної групи колективу, буде відштовхуватись від нього [6], тим самим даючи місце іншим агентам прийняти участь у складнішій задачі.

Агент постійно має власну оцінку ефективності поточної задачі (корисності) і проводить порівняння з можливою корисністю при виконанні переліку задач, які належать до його бажань. У випадку, якщо оцінка корисності агента (за оцінкою власних ресурсів) буде більшою і ймовірність виконання завдання перевищує задану, агент залишає поточне завдання і долучається до виконання складнішого. Про що сповіщає локальну групу.

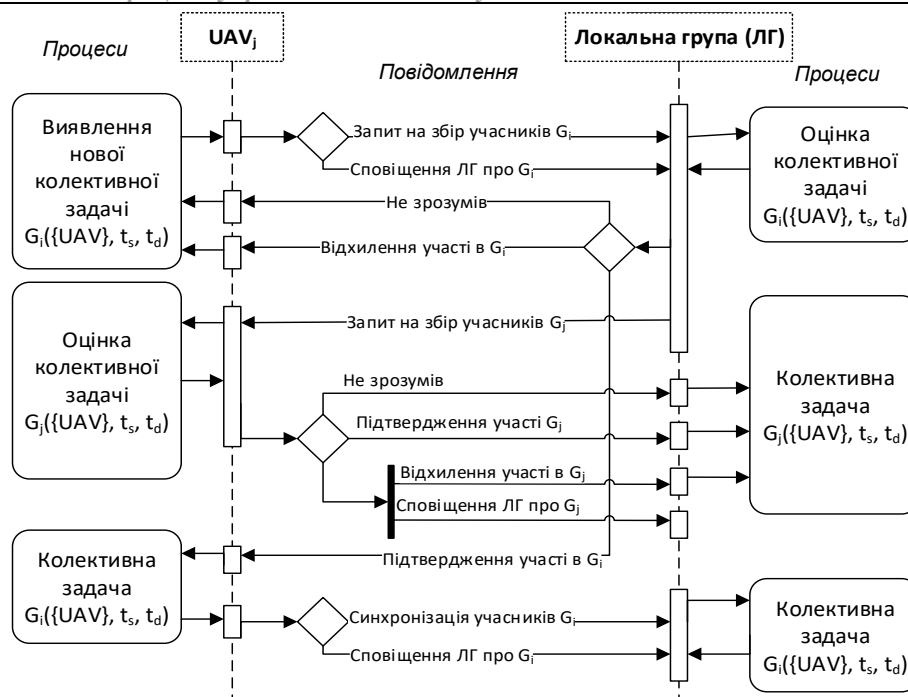


Рисунок 5. Мережевий протокол взаємодії окремого БПЛА з локальною групою

У випадку, описаному вище, коли БПЛА знаходить ціль – він прагне приєднати до задачі розпізнавання (задачі вищого рівня) інших учасників локальної групи, щоб підвищити власну корисність.

Висновки

Даний підхід дозволяє формалізувати групові задачі, визначені в керівних документах як притаманні для виконання БПЛА, і сформувані множини колективних задач, які автономна група може синтезувати в процесі застосування.

Застосування алгоритму прийняття рішення агентом на участь в колективному завданні, що базується на мережевому протоколі взаємодії окремого БПЛА з локальною групою, дозволяє підвищити автономність групи. Це відбувається за рахунок суттєвого зменшення кількості управляючої інформації в ланці “Група БПЛА – НПУ”, відповідно до розподіленого вирішення задачі цілерозподілу, порівняно із випадком централізованої організації міжагентної взаємодії з НПУ.

Аналіз задач різного рівня складності вказує на необхідність дослідження впливу якості автономного управління на можливість реалізації складних і інтегральних задач. Адже невиконання дії одним з БПЛА при виконанні простої задачі не впливає на завдання інших БПЛА; невиконання дії одним з БПЛА при виконанні складної задачі – зводить нанівець дії підгрупи; для інтегральних задач, в залежності від рівня ієрархії, втрачається або вся задача або її складова. Тому, в подальшому необхідно дослідити баланс між ефективністю виконання підзадач великої складності і ризиками втрати ресурсів групи при невиконанні певної дії, з метою визначення оптимальної кількості БПЛА в групі, яка призначається в певний район.

Даний підхід є відправною точкою для впровадження ройового застосування БПАС з будь-якою кількістю БПЛА в групі.

Список використаних джерел

1. Стратегічний оборонний бюлетень України, затв. Указом Президента України від 17 вересня 2021 року № 473/2021.
2. Adelinde M. Uhrmacher, Danny Weyns, Multi-Agent Systems Simulation and Applications, CRC Press, 2018, ISBN 142007024X, 9781420070248.
3. Shoham, Yoav; Leyton-Brown, Kevin (2008). Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. Cambridge University Press. p. 496. ISBN 978-0-521-89943-7.
4. Weiss, Gerhard, ed. (1999). Multiagent Systems, A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press. ISBN 978-0-262-23203-6.
5. Oleksii Martyniuk, Pavlo Shchypanskyi, Vitalii Savchenko, Ihor Kostyuk, Air Defense Planning from an Impact of a Group of Unmanned Aerial Vehicles based on Multi-Agent Modeling. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020. – №8(4). – pp. 1302-1308. – DOI: 10.30534/ijeter/2020/59842020/
6. Мартинюк О. Р. Модель узгодженого руху групи безпілотної літальних апаратів // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: НУОУ, 2016. – № 1 (25). – 214 с. – С. 78-81.
7. Ярошенко Я. В., Герасименко В. В., Коротін С. М., Блискун О. Є. (2021). Класифікація завдань спільного бойового порядку пілотованої та безпілотної авіації в операціях. Повітряна міць України, 1(1), 41–46. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-41-46>.
8. Bratman M., 2009, “Intention, Belief, and Practical Rationality,” in Reasons for Action, D. Sobel and S. Wall (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, pp. 13–36.
9. Stuart J. Russell, Peter Norvig (2003), Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, c. 24, ISBN 0-13-790395-2.

10. Субботін С.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія [Електронний ресурс] / С.О. Субботін. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.

11. Сучасний метод бойових потенціалів в прикладних задачах планування розвитку та застосування тактичної авіації: монографія / Б.Й. Семон, О.Б. Леонт'єв, О.Б. Котов та ін. // за ред. Б.Й. Семона та О.Б. Леонт'єва. – К.: НАОУ, 2009. – 336 с., ISBN 978-966-8546-35-8.

Oleksii Martyniuk (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

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

Volodymyr Medvedev (Candidate of Military Sciences, Professor)

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

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF SUBDIVISIONS OF STRIKE UAVS

The article is devoted to clarification an approach to forming a set of tasks in an unmanned aviation system with an autonomous group of unmanned aerial vehicles. Within this approach, information technology is described in a multi-agent system for the autonomous synthesis by intelligent agents of a collective task, which is performed by a specific group of agents. During the preparation stage, the approach aligns the set of main purposes of unmanned aviation systems with the set of agent capabilities when forming simple, complex, integral, and network collective tasks. At the application stage, intelligent agents autonomously synthesize a collective task to maximize the utility function of the unmanned aviation system.

The article will be useful for decision-makers on the application of unmanned aviation systems and researchers developing innovative forms and methods of applying unmanned aviation systems.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, collective task, multi-agent system, interaction, information technology, artificial intelligence.*

References

1. Strategic Defense Bulletin of Ukraine, approved by the Decree of the President of Ukraine dated September 17, 2021 No. 473/2021.

2. Adelinde M. Uhrmacher, Danny Weyns, Multi-Agent Systems Simulation and Applications, CRC Press, 2018, ISBN 142007024X, 9781420070248.

3. Shoham, Yoav; Leyton-Brown, Kevin (2008). Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. Cambridge University Press. p. 496. ISBN 978-0-521-89943-7.

4. Weiss, Gerhard, ed. (1999). Multiagent Systems, A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press. ISBN 978-0-262-23203-6.

5. Oleksii Martyniuk, Pavlo Shchypanskyi, Vitalii Savchenko, Ihor Kostiuk, Air Defense Planning from an Impact of a Group of Unmanned Aerial Vehicles based on Multi-Agent Modeling. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020. – №8(4). – pp. 1302-1308. – DOI: 10.30534/ijeter/2020/59842020/

6. Martyniuk O. R. Model of coordinated movement of a group of unmanned aerial vehicles // Modern information

technologies in the field of security and defense. – К.: NUOU, 2016. – № 1 (25). – 214 p. – P. 78-81.

7. Yaroshenko Ya., Gerasimenko V., Korotin S., Martyniuk O., & Blyskun O. (2021). Classification of tasks of joint combat order of manned and unmanned aviation in operations. Air Power of Ukraine, 1(1), 41–46. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-41-46>.

8. Bratman M., 2009, "Intention, Belief, and Practical Rationality," in Reasons for Action, D. Sobel and S. Wall (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, pp. 13–36.

9. Stuart J. Russell, Peter Norvig (2003), Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, p. 24, ISBN 0-13-790395-2.

10. Subbotin S. Noniterative, evolutionary and multi-agent methods for the synthesis of fuzzy and neural network models: Monograph / S. Subbotin. – Zaporizhzhia: ZNTU, 2009. – 375 p.

11. Modern method of combat potentials in applied problems of planning the development and use of tactical aviation: monograph / B.Y. Semon, O.B. Leontiev, O.B. Kotov and others. // ed. B.Y. Semon and O.B. Leontiev. – К.: NАОU, 2009. – 336 p., ISBN 978-966-8546-35-8.

ПИТАННЯ РОЗВИТКУ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

[DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-87-95](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-87-95)

[УДК 623.7](#)

¹Глоба Олександр Володимирович (доктор філософії)
<https://orcid.org/0000-0002-1423-8365>

¹Мельниченко Василь Семенович (кандидат військових наук)
<https://orcid.org/0000-0002-0598-9765>

²Скиба Андрій Миколайович

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

²Міністерство оборони України, Київ, Україна

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ УГРУПОВАННЯ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК

Досвід застосування військових частин і підрозділів ЗРВ у складі угруповань ЗРВ свідчить про те, що рівень відновлення ОВТ не задовольняє існуючим потребам війни. Це підкреслює актуальність пошуку шляхів підвищення ефективності відновлення ОВТ вже сьогодні. Метою статті є відображення результатів дослідження ефективності відновлення ОВТ в угрупованні ЗРВ змішаного складу та надання рекомендацій щодо підвищення ефективності відновлення під час виконання завдань з ППО в зоні ведення бойових дій.

Під час оцінювання ефективності відновлення ОВТ, були враховані наступні внутрішні фактори: кількісний склад та кваліфікація ремонтного персоналу, наявність ефективної інформаційної підтримки при виконанні складних технологічних операцій ремонту, забезпеченість інструментами та матеріалами, необхідними для проведення ремонту. Стаття може бути корисною для фахівців ЗРВ, а також всіх осіб, зацікавлених питаннями відновлення ОВТ в сучасних умовах ведення бойових дій.

Ключові слова: угруповання зенітних ракетних військ, відновлення, озброєння та військової техніки, підвищення ефективності.

Вступ

Аналіз досвіду російсько-української війни свідчить про те, що при проведенні повітряно-наземних операцій пріоритетним напрямом збройної боротьби є застосування авіаційної компоненти, яка здатна у стислі терміни завдати рішучих ударів по протилежній стороні шляхом застосування авіаційних засобів ураження [1-7].

Під час застосування засобів повітряного нападу противник постійно прагне відшукати слабкі місця в нашій системі протиповітряної оборони в цілому, і в системі зенітного ракетного прикриття зокрема. Він намагається придушити систему шляхом використання різноманітних вогневих, радіоелектронних засобів, а також шляхом комбінування їх дій. За досвідом війни, для забезпечення виконання цього завдання, противник може виділяти до 35-40%, а у випадку проведення повітряної наступальної операції, і більше засобів щодобово [1,2,3,6,7]. Наявність у противника точних даних щодо зосередження угруповання зенітних ракетних військ дають йому перевагу під час застосуванні засобів повітряного нападу.

Аналіз результатів протиповітряних боїв, бойових дій угруповань зенітних ракетних військ (ЗРВ) свідчить про те, що середньодобові втрати

озброєння та військової техніки (ОВТ) можна очікувати на рівні до 20%, а у перший день операції вони можуть навіть сягати 35% [6,7]. Наведені втрати можуть змінюватися в залежності від умов бойових дій, але вони дають уяву про ті складні завдання, які стоять перед системою відновлення ОВТ в ході ведення бойових дій.

Отримані в ході російсько-української війни статистичні дані свідчать про те, що відсоток ушкоджень ОВТ від сучасних засобів ураження збільшується в бік підвищення ступеня складності відновлювальних робіт, а також збільшення безповоротних втрат техніки [6,7,8]. У зв'язку з цим зростає значимість питання організації технічного забезпечення підрозділів, зокрема, вирішення завдань відновлення ОВТ.

Для забезпечення потрібного рівня відновлення ОВТ особливої ваги набувають питання щодо раціонального використання сил та засобів ремонтно-відновлювальних органів (РВО) у системі логістичного забезпечення (ЛЗ), підвищення ефективності їх роботи, у тому числі, за рахунок скорочення часу на переміщення майстерень, їх згортання та розгортання, раціонального планування роботи тощо. Це можливо досягти, у тому числі, і завдяки

своєчасному оцінюванню ефективності відновлення ОВТ, як складової системи ЛЗ Повітряних Сил ЗС України та своєчасному вжиттю відповідних заходів.

Досвід застосування військових частин і підрозділів ЗРВ також свідчить про те, що рівень відновлення ОВТ не задовольняє існуючим потребам, що підкреслює актуальність пошуку шляхів підвищення ефективності відновлення ОВТ в сучасних умовах ведення війни.

Тому, метою статті є відображення результатів дослідження ефективності відновлення ОВТ в угрупованні ЗРВ змішаного складу та надання рекомендацій щодо підвищення ефективності відновлення під час виконання завдань з ППО в зоні ведення бойових дій.

Матеріали та методи

Розглянуті методики оцінювання ефективності відновлення ОВТ [9-14] дають змогу оцінити ефективність відновлення ОВТ в цілому та її вплив на рівень забезпечення підрозділів працездатними зразками ОВТ в ході ведення бойових дій. У той же час, вказані методики не враховують час проведення відновлювального ремонту з урахуванням реальної навченості фахівців-ремонтників РВО, який надає більш високу достовірність розрахунків. Як наслідок, це не дозволяє обґрунтовано обирати кращий варіант відновлення в конкретних умовах обстановки та забезпечувати потрібну боездатність угруповання ЗРВ.

В ході дослідження оцінювання ефективності відновлення ОВТ проводилось на прикладі угруповання ЗРВ із zenітними ракетними комплексами типу ЗРК-1 і ЗРК-2 у своєму складі. Аналіз факторів, що впливають на ефективність відновлення ОВТ угруповання ЗРВ із ЗРК-1, ЗРК-2 у своєму складі надав можливість зробити висновки, що головними чинниками низького рівня відновлення ОВТ стали невідповідності між:

розподілом ОВТ, що зазнало пошкодження, за рівнями проведення ремонту та наявністю РВО відповідних рівнів (тактичний, оперативний та стратегічний);

реальними та розрахунковими виробничими спроможностями РВО.

Ефективність застосування угруповання ЗРВ змішаного складу (ЗРК-1, ЗРК-2) в зоні ведення бойових дій безпосередньо пов'язана з постійним підтриманням ОВТ у готовності до застосування за призначенням [15-20].

Для забезпечення необхідного (вимагаемого) рівня ефективності відновлення ОВТ актуальним є питання ефективного застосування сил і засобів РВО, а саме, підвищення ефективності їх використання (скорочення витрат часу на переміщення рухомих засобів технічного обслуговування і ремонту (РЗТОіР), розгортання та згортання їх у визначеному районі, організація ремонту, забезпечення достатньої інформаційної підтримки технологічних операцій), раціональне планування робіт та інше. Визначення шляхів вирішення даного питання ґрунтується на

проведенні своєчасного та правильного оцінювання ефективності відновлення ОВТ [12].

Аналіз досвіду застосування ремонтно-відновлюваних органів в умовах повномасштабної агресії російської федерації проти України дає можливість зробити висновок, що кваліфікація ремонтного персоналу та матеріальна складова відновлення ОВТ (забезпечення РВО сучасними засобами з технічного обслуговування і ремонту) має пріоритет перед впровадженням нових організаційно-технічних рішень і підходів щодо відновлення ОВТ з урахуванням реальних умов.

У разі застосування підрозділів ЗРВ, у складі угруповань ПС ЗС України, відновлення ОВТ покладається на РВО безпосередньо в районах відповідальності (смугах бойових дій).

Можливості РВО щодо відновлення ОВТ визначаються умовами обстановки, ступенями його пошкодження, видом необхідних робіт, фондом робочого часу, виробничими можливостями та кваліфікацією особового складу.

Вид необхідних відновлювальних робіт і ступінь пошкодження ОВТ, у свою чергу, визначають необхідні трудовитрати, які розраховують за визначеними нормами часу на технічне обслуговування і ремонт у відповідних нормативних документах та довідниках для ремонтних органів родів військ.

Відновлювальний ремонт ОВТ, яке отримало бойові пошкодження, проводиться у бойових порядках силами обслуг та ремонтно-відновлювальних бригад від частин і підрозділів. До проведення відновлювального ремонту також можуть залучатися ремонтні підрозділи бригад (полків) ЗРВ ПС ЗС України, частин матеріально-технічного забезпечення ПС ЗС України, виїзні бригади ремонтних підприємств України та підприємств-виробників.

Ремонтно-відновлювальні роботи на техніці, залежно від характеру і ступеня пошкодження, трудомісткості робіт, можна проводити в обсязі поточного, середнього та капітального ремонтів.

Середній і капітальні ремонти проводять, як правило, агрегатним методом згідно з нормативно-технічною документацією за повним або скороченим технологічним циклом в залежності від технічного стану ОВТ та бойової обстановки, яка склалася.

Відповідність ступеня бойових пошкоджень ОВТ зі складу сил та засобів, що потребують відновлення, очікуваний час на відновлення наведені у [9].

Отже, визначення ступеня пошкодження ОВТ передбачає оцінювання таких складових:

стану бойової готовності ОВТ;

складу сил і засобів, що необхідні для його відновлення;

очікуваного часу відновлення.

Слід зауважити, що на даний час у ЗС України обмежений запас ОВТ ЗРВ, який необхідний для заміни пошкодженого ОВТ для збереження бойового потенціалу угруповання ЗРВ. У зв'язку з цим, слід врахувати, що кожний ЗРК в одиницю

часу може знищити в середньому C_1 умовних бойових засобів противника. В свою чергу, кожний умовний бойовий засіб противника здатний знищувати в одиницю часу в середньому C_2 зразків ОВТ наших військ (сил). Тоді, за час простою (тобто, час проведення відновлювального ремонту) t_{np} нашого ЗРК у противника збережеться $C_1 \cdot t_{np}$ зразків озброєння, які за цей же час можуть нанести збиток $\Delta\Pi_{np}$ нашим військам, який дорівнює:

$$\Delta\Pi_{np} = C_1 \cdot t_{np} \cdot C_2 \cdot t_{np} = C_1 \cdot C_2 \cdot t_{np}^2. \quad (1)$$

Таким чином, збиток, обумовлений простоем невідновленого зразка ОВТ є пропорційним квадрату часу його простою. Це підтверджує важливість зведення до мінімуму часу ремонту (відновлення) непрацездатного зразка ОВТ, який є критично важливим для функціонування ЗРК.

Тому, за основний показник оцінювання ефективності відновлення доцільно обрати час проведення відновлювального ремонту:

$$T = \frac{1}{\Pi}, \quad (2)$$

де Π – середньодобова продуктивність РВО, зразків на добу.

Враховуючи велике значення саме ремонту (відновлення) у загальній системі відновлення ОВТ угруповання ЗРВ (що, у свою чергу, залежить від продуктивності РВО), пропонується ввести коефіцієнт придатності органу до проведення відновлювальних робіт $K_{прод.}$, який буде складатися з добутку часткових рівнозначних складових. Припускаючи, що значення $K_{прод.} \in [0; 1]$, то величина кожного з його складових матиме величину від 0 до 1, в залежності від оцінки кожної окремої складової, де 0 – повністю непридатний до виконання завдання зразок, а 1 – спроможний виконати завдання в повному обсязі у встановлений час. З урахуванням даного припущення маємо наступний вираз:

$$K_{прод.} = K_{тех.} \cdot K_{гот.о/с+док.}, \quad (3)$$

де $K_{тех.}$ – коефіцієнт технічної готовності до проведення відновлювальних робіт (ремонт), який враховує наявність відповідних інструментів та матеріалів необхідних для проведення робіт, тобто

$$K_{тех.} = \frac{M_{наявн.}}{M_{необх.}}, \quad (4)$$

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 відновлювальних робіт (ремонт) та наявність відповідної документації (технологічні карти, схеми, інструкції і т.п.), який можна розрахувати як

$$K_{гот.о/с+док.} = \frac{(K_{навч.} + K_{інф.})}{2}, \quad (5)$$

де $K_{навч.}$ – коефіцієнт навченості особового складу (пропонується визначати згідно таблиці зазначеної у додатку Б);

$K_{інф.}$ – коефіцієнт наявності відповідної документації (технологічні карти, схеми, інструкції тощо). $K_{інф.}$ є співвідношенням кількості наявної документації до кількості документації повного комплекту

$$K_{інф.} = \frac{D_{наяв.}}{D_{повн.к-т}}, \quad (6)$$

де $D_{наяв.}$ – кількість наявної документації (технологічні карти, схеми, інструкції тощо);

$D_{повн.к-т}$ – кількість документації повного комплекту (технологічні карти, схеми, інструкції тощо) на зразок озброєння.

Таким чином, з урахуванням (1) та (3), отримуємо:

$$K_{прод.} = \frac{K_{тех.} \cdot (K_{навч.} + K_{інф.})}{2}. \quad (7)$$

Далі, середньодобову продуктивність РВО (одноканального) будемо розраховувати як

$$\Pi = \frac{\Phi \cdot K_{прод.}}{H}, \quad (8)$$

де Φ – середньодобова величина дійсного фонду робочого часу даного РО, люд.-год./добу;

H – величина трудомісткості певного виду ремонту зразка ОВТ, що проводиться в даному РО, люд.-год./зразок.

Середньодобова величина дійсного фонду робочого часу одного РВО, вимірювана протягом доби його роботи, дорівнює:

$$\Phi = n^0 \cdot t_p, \quad (9)$$

де n^0 – кількість спеціалістів-ремонтників в даному РВО;

t_p – робочий час у годинах на добу.

Враховуючи, що величина часу, витраченого на проведення того чи іншого виду ремонту зразка розраховується за виразом (2), а також враховуючи вирази (7), (8), (9), отримаємо наступний вираз для визначення часу відновлювального ремонту ОВТ:

$$T_{рем.} = \frac{2 \cdot H}{n^0 \cdot t_p \cdot K_{тех.} \cdot (K_{навч.} + K_{інф.})}. \quad (10)$$

При цьому, $T_{рем.}$ є складовою загального часу відновлення, тобто

$$T_{відн.розр.} = T_{тр.} + T_{ев.} + T_{рем.} + T_{дост.}, \quad (11)$$

де $T_{тр.}$ – час проведення технічної розвідки;

$T_{ев}$ – час, який потрібний на проведення евакуації пошкоджених зразків ОВТ;

$T_{дост}$ – час, який потрібний на доставлення від старшого начальника до РВО спеціалістів-ремонтників, а також інструментів і матеріалів, які необхідні для проведення робіт.

У якості критерія доцільно обрати відповідність часу відновлення пошкоджених зразків ОВТ $T_{відн.розр.}$ відповідним визначеним рівням $T_{відн.побр.}$

Таким чином, ми отримали залежності часу проведення ремонту від наступних складових: коефіцієнту технічної готовності до проведення відновлювальних робіт (ремонту); коефіцієнту навченості особового складу; коефіцієнту наявності відповідної документації (технологічні карти, схеми, інструкції тощо); кількості спеціалістів-ремонтників в РВО; робочого часу спеціалістів-ремонтників на добу. Запропонований математичний апарат ліг в основу методики оцінювання ефективності відновлення озброєння та військової техніки угруповання зенітних ракетних військ змішаного складу.

Результати

З метою визначення напрямків підвищення ефективності відновлення ОВТ угруповання ЗРВ змішаного складу (ЗРК-1, ЗРК-2) пропонується проаналізувати отримані результати оцінювання часу проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

Спочатку аналізуються дані, які отримані для слабких пошкоджень, шляхом побудови графіків відповідних залежностей.

Графік залежності часу проведення ремонту від коефіцієнту навченості особового складу та коефіцієнту наявності відповідної документації, зображено на рисунку 1.

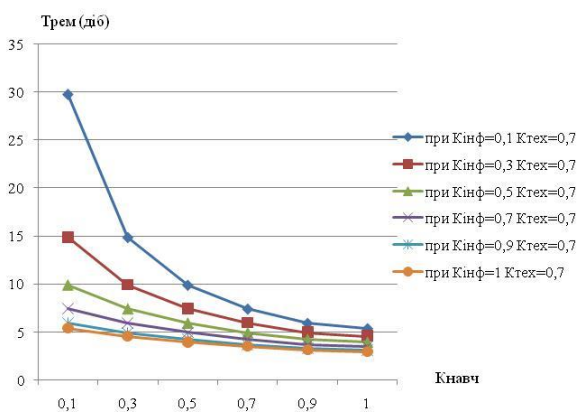


Рисунок 1. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від $K_{навч}$ при різних $K_{інф}$

Провівши аналіз отриманого графіка, можна зробити висновок, що збільшення $K_{навч}$ та/або $K_{інф}$ (крок збільшення 0,2) дозволяє значно скоротити час проведення ремонтних робіт (25-50%) при варіюванні значень $K_{навч}$ та/або $K_{інф}$ у межах від 0,1 до 0,7. При більш високих значеннях $K_{навч}$ та/або $K_{інф}$ (в межах від 0,8 до 1) підвищення даних коефіцієнтів призводить до зменшення часу проведення ремонтних робіт на рівні 5-16%. З урахуванням того, що оперативно впливати на

рівень навченості особового складу просто неможливо, впливати на зменшення часу ремонтних робіт можливо за рахунок підвищення повноти відповідної технічної документації.

Графік залежності часу проведення ремонту від коефіцієнту технічної готовності до проведення ремонту та коефіцієнту наявності відповідної документації, зображений на рисунку 2.

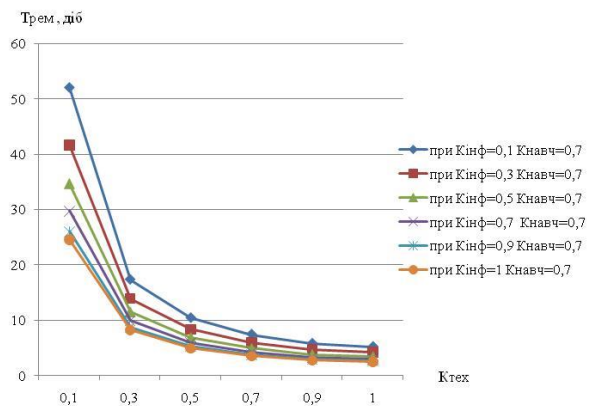


Рисунок 2. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від $K_{тех}$ при різних $K_{інф}$.

Провівши аналіз отриманого графіка можна дійти висновку, що більший вплив на зменшення часу проведення ремонту має збільшення $K_{тех}$, ніж збільшення $K_{інф}$, при цьому, відстежується тенденція зниження впливу на час проведення ремонту при збільшенні $K_{тех}$ від 67% до 11%.

Графік залежності часу проведення ремонту від кількості спеціалістів-ремонтників в РВО та їх робочого часу на добу, зображено на рисунку 3.

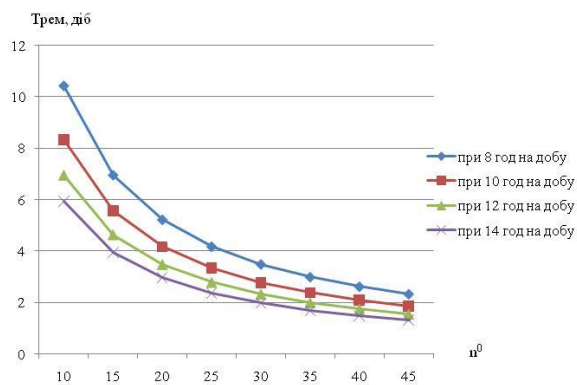


Рисунок 3. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від n^0 при різних t_p .

Аналіз графіку свідчить про те, що вплив кількості задіяного у ремонті особового складу та часу його роботи на добу зворотно пропорційний часу проведення ремонтних робіт. При цьому, слід зауважити, що час роботи особового складу на добу, без виняткової необхідності, не повинен перевищувати 12 годин на добу та не більше 3-х дб поспіль. Перевищення цієї вимоги значно впливає на працездатність особового складу, яка буде значно знижуватися через втому. Також, збільшення кількості особового складу, який залучається до проведення ремонту, повинне мати

обмеження, інакше зі збільшенням його кількості збільшуватиметься і час їх простою через те, що об'єкт ремонту або певний інструмент може бути зайнятий іншим ремонтником і особовий склад не спроможний виконувати ремонтні роботи.

Графік залежності часу ремонту від кількості спеціалістів-ремонтників та наявності відповідної документації, зображений на рисунку 4.

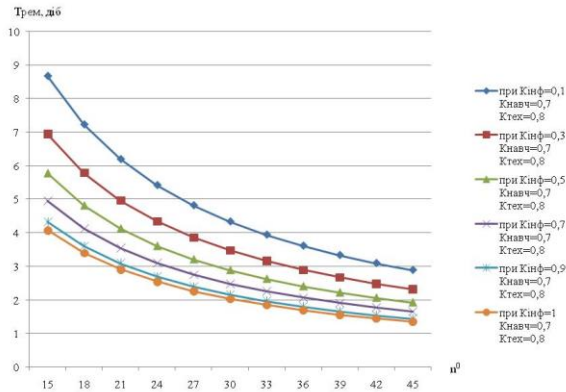


Рисунок 4. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від n^0 при різних $K_{инф}$.

Аналіз графіка свідчить про те, що при низькому коефіцієнтові наявності потрібної документації (від 0,1 до 0,7), для зменшення часу проведення ремонтних робіт більш доцільно збільшувати саме його, а не кількість особового складу, що залучається до проведення ремонтних робіт, а при достатньо високих ($K_{инф} \geq 0,7$), доцільніше збільшувати кількість особового складу, що залучається саме до ремонтних робіт.

Графік залежності часу проведення ремонту від кількості спеціалістів-ремонтників в РВО та коефіцієнту технічної готовності до проведення ремонту, зображено на рисунку 5.

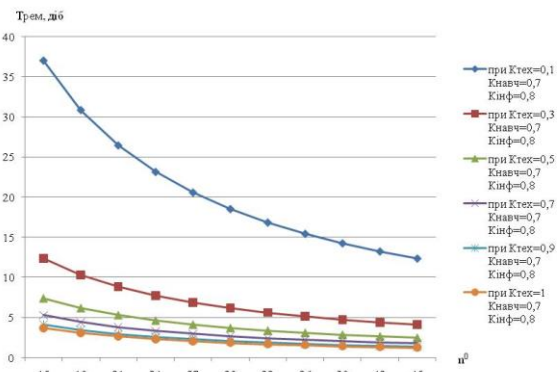


Рисунок 5. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від n^0 при різних $K_{тех}$.

Провівши аналіз отриманого графіка можна дійти наступного висновку – при низькому коефіцієнту технічної готовності до проведення ремонту (від 0,1 до 0,7), для зменшення часу проведення ремонтних робіт доцільніше збільшувати саме його, а не кількість особового складу, який залучається до проведення ремонтних робіт, а при достатньо високих ($K_{тех} \geq 0,7$),

доцільніше збільшувати кількість особового складу, який залучається до проведення ремонтних робіт.

Наступним кроком є відображення даних, які відображають вплив середніх пошкоджень. Графік залежності часу проведення ремонту від коефіцієнту навченості особового складу та коефіцієнту наявності відповідної документації, зображено на рисунку 6.

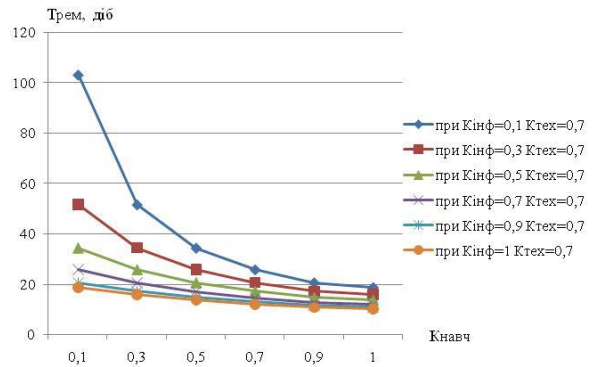


Рисунок 6. Графік залежності часу $T_{рем}$ від $K_{навч}$ при різних $K_{инф}$.

Графіки залежності часу проведення ремонту від рівня технічної готовності та кількості спеціалістів-ремонтників у РВО зображені на рисунках 7 і 8 відповідно.

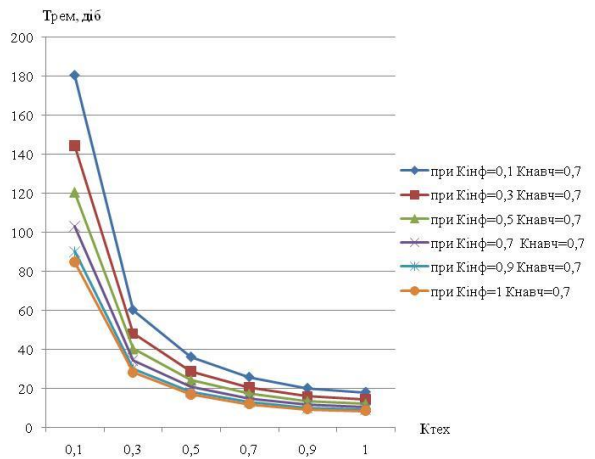


Рисунок 7. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від $K_{тех}$ при різних $K_{инф}$.

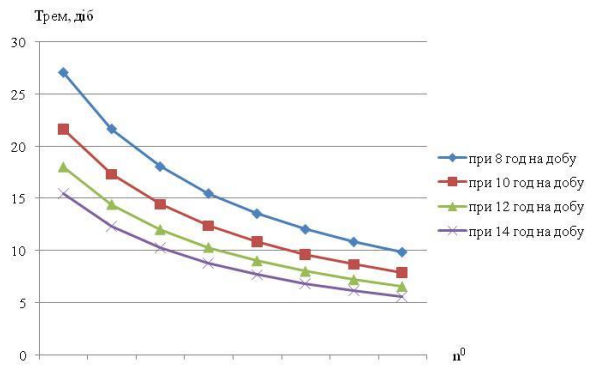


Рисунок 8. Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від n^0 при різних t_p .

Графік залежності часу проведення ремонту від кількості спеціалістів-ремонтників у РВО та коефіцієнту наявності відповідної документації зображений на рисунку 9.

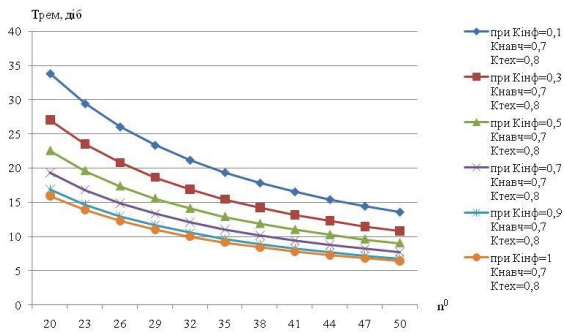


Рисунок 9 – Графік залежності часу ремонту $T_{рем}$ від n^0 при різних $K_{инф}$.

Проведення порівняльного аналізу графіків, побудованих для середніх та для слабких пошкоджень, дає підстави зробити наступний висновок: тенденції змін всіх залежностей є однаковими, як для слабких пошкоджень, так і для середніх пошкоджень, змінюються тільки рівні значень.

Обговорення

Під час формалізації завдання з оцінювання ефективності відновлення ОВТ та уточнення порядку проведення розрахунків для визначеного складу угруповання ЗРВ (тобто, для ЗРК-1 і ЗРК-2), було визначено, що у якості показника оцінювання ефективності відновлення ОВТ ЗРВ доцільно обирати час проведення ремонтно-відновлювальних робіт. Також, були враховані наступні внутрішні фактори: кількісний склад та кваліфікація ремонтного персоналу, наявність ефективної інформаційної підтримки при виконанні технологічних операцій ремонту складових частин зразків ОВТ та зразків ОВТ в цілому; забезпеченість РВО інструментами та матеріалами, необхідними для проведення ремонту.

Проведені розрахунки дозволили визначити залежність часу ремонтно-відновлювальних робіт від зазначених факторів. Це, у свою чергу, надало можливість визначити, зміна яких показників має найбільший вплив на час проведення ремонтно-відновлювальних робіт з урахуванням наявних ресурсів.

Отже, аналіз проведених розрахунків дозволяє визначити, що при низьких значеннях коефіцієнтів технічної готовності до проведення ремонту і (або) навченості особового складу, низької наявності потрібної документації (технологічних карт, схем, інструкцій тощо) 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 спеціалістів, який залучається до проведення ремонтних робіт.

Також, за результатами проведених

розрахунків, для підвищення ефективності відновлення ОВТ угруповання ЗРВ змішаного складу (ЗРК-1, ЗРК-2) в зоні ведення бойових дій, сформульовано кілька рекомендацій, які можна умовно поділити на такі, що необхідно запроваджувати “негайно” та такі, що потребують “планового” запровадження.

Рекомендації, які необхідно запроваджувати “негайно” для ЗРК-1:

створення електронної бази технічної документації (технологічних карт, схем, інструкцій тощо), що дозволить значно підняти $K_{инф}$ для всіх підрозділів, які мають на озброєнні ЗРК типу ЗРК-1 ще до початку ведення бойових дій, а також надасть можливість підняти $K_{инф}$ 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);

закупівля та оснащення РВО тактичного рівня сучасними ремонтними засобами, інструментами та пристосуваннями з обов'язковою наявністю спеціальних транспортних засобів, станків, власних дизельних генераторів, підйомно-кранового обладнання, що дозволить підняти $K_{тех}$;

внесення змін до організаційно-штатної структури зенітних ракетних підрозділів – пропонується розширити відділення технічного обслуговування до взводу технічного обслуговування і ремонт. До кожного відділення взводу доцільно ввести мобільну майстерню, спеціалізовану за напрямом проведення ремонтів, яка розташована на шасі типу КраЗ із критим причепом (для перевезення ЗПП, додаткових інструментів та матеріалів, наметів для розгортання ремонтних майстерень в польових умовах, дизель-генераторів), а також машину для перевезення особового складу.

Для ЗРК-2 варто виділити наступні “негайні” рекомендації:

переведення наявної технічної документації на державну мову;

проведення дооснащення наявних ЗРК-2 інструментами (пристосуваннями), які необхідні вже за наявним досвідом експлуатації.

Спільні рекомендації для ЗРК-1 та ЗРК-2:

створення та постійне оновлення 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 технічної розвідки та визначення необхідних інструментів та матеріалів, потрібних для проведення ремонтних робіт;

створення та постійне оновлення єдиної електронної бази наявності запасних частин зразків зенітного ракетного озброєння, що дозволить значно скоротити час пошуку запасних частин при їх відсутності у військовій частині;

визначення необхідності створення “тилового

табору вогневого підрозділу”, який слід розташовувати в межах визначеного позиційного району на відстані 5-15 км від вогневих позицій. До складу “тилового табору” доцільно залучати: спеціалістів-ремонтників, які не входять до складу бойових обслуг; спеціально обладанні транспортні засоби, на яких перевозиться основна частина ЗІП; мобільні майстерні та інші сили і засоби, які безпосередньо не залучаються до ведення протиповітряних боїв.

Рекомендації, які потребують “планового” запровадження:

формування РВО оперативного рівня (ремонтно-відновлювальний батальйон (полк) у кожному повітряному командуванні), що дозволить зменшити навантаження на РВО тактичного рівня, а також виділяти виїзні ремонтні бригади для допомоги РВО тактичного рівня;

при створенні угруповання ЗРВ до його складу залучати зенітні ракетні бригади (полки) з підрозділами забезпечення (ремонтно-технічна рота, технічна батарея, рота матеріального забезпечення), у випадку залучення бригад (полків) не в повному складі, визначати звідки надавати підрозділи забезпечення;

створення оперативного запасу “критично важливих” для ОВТ ЗРВ запасних частин, який має зберігатися на мінімально безпечовій відстані від угруповання ЗРВ (що є особливо важливим для ЗРК типу ЗРК-2);

під час призначення особового складу на посади спеціалістів-ремонтників враховувати освіту та досвід роботи у споріднених спеціальностях, за можливістю організувати курси підвищення кваліфікації.

Висновки

Таким чином, аналіз проведених розрахунків дозволить визначити ті показники, зміна яких має найбільший вплив на час проведення ремонтно-відновлювальних робіт, з урахуванням наявних ресурсів, та визначити рекомендації, практична реалізація яких дозволяє підвищити ефективність відновлення ОВТ угруповання ЗРВ змішаного складу під час виконання завдань з ППО.

Практична реалізація рекомендацій надасть можливість відповідним командирам зменшити вплив таких чинників, як: кількісний склад та кваліфікація ремонтного персоналу, наявність ефективної інформаційної підтримки при виконанні технологічних операцій ремонту складових частин зразків ОВТ і зразків ОВТ в цілому, забезпеченість РВО інструментами та матеріалами, необхідними для проведення ремонту. Як наслідок, можна отримати більш високу достовірність прогнозу виробничих можливостей РВО на тактичному рівні, що також сприятиме підвищенню ефективності відновлення ОВТ угруповання ЗРВ змішаного складу під час виконання завдань з протиповітряної оборони в зоні ведення бойових дій.

Предметом подальших пошуків можестати дослідження впливу створення РВО оперативного

рівня на зменшення загального часу відновлення ОВТ ЗРВ.

Список використаних джерел

1. Головнокомандувач ЗС України. Офіційний канал в Telegram. URL: <https://t.me/CinCAFU>.

2. Генеральний штаб ЗСУ України. Офіційна сторінка в Facebook. URL: <https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua>.

3. Повітряні Сили ЗС України. Офіційний канал в Telegram. URL: <https://t.me/s/kpszs>.

4. Воєнно-історичний опис російсько-української війни (січень 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 168 с.

5. Воєнно-історичний опис російсько-української війни (лютий 2023 року): військова публікація / В. Ф. Залужний, Є. Мойсюк, С. Шаптала та ін. Київ: МОУ; ГШ ЗС України, 2023. 184 с.

6. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року): навч. посіб. / М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, В. П. Бринцева. Київ : НУОУ, 2024. 96 с.

7. Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року): навч. посіб. / Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, В. П. Бринцева. Київ : НУОУ, 2024. 103 с.

8. Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння : навч. посіб. / Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, О. В. Глоба., В. П. Бринцева.; за заг. ред. А. Г. Салія. К.: НУОУ, 2024. 140 с.

9. Теоретичні основи матеріально-технічного забезпечення військ (сил): навчальний посібник; за заг. ред. В. О. Шуєкіна. К.: ЦНДІ, 2010. 843 с.

10. Наказ Генерального штабу Збройних сил України № 213 від 24 травня 2016 року “Про затвердження Інструкції з формування оперативнo-стратегічних, оперативнo-тактичних та загальних вимог до озброєння та військової техніки Збройних Сил України”.

11. Методика вибору варіантів ведення технічної розвідки та евакуації пошкоджених зразків озброєння та військової техніки в ході ведення бойових дій. Науководослідна робота. К.: НУОУ, 2018.

12. Організація експлуатації та ремонту озброєння та військової техніки зенітних ракетних військ: підручник за заг. ред. А. В. Крижного, Б. М. Ланецького. НУОУ, 2018. 592 с.

13. В. В. Старцев. “Методики оцінювання ефективності відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України”. ХНУПС. Збірник наукових праць Державного науководослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Вип. №2 (12), 2022.

14. О. Сампір “Удосконалена методика оцінювання системи відновлення озброєння та військової техніки окремої механізованої бригади”. Journal of scientific papers “Social Development and Security”, Vol. 11, Number 5, 2021.

15. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Горопчин, І.О. Романенко, Ю.Г. Даник та ін. Київ: МО

України, Харків: ХВУ, 2003. 368 с.
<https://elib.nuou.org.ua/katalog/dovidnyk-pvo.html>.

16. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1994.

17. ДСТУ В 15.602:2022. Система розроблення і поставлення на виробництво озброєння та військової техніки. Ремонт озброєння та військової техніки. Частина І. Основні положення. Класифікація. Київ: ДП “Укр НДНЦ”, 2023.

18. Тимчасове керівництво з організації та проведення ремонтно-відновлювальних робіт на озброєнні і військової техніки зенітних ракетних військ

Повітряних Сил Збройних Сил України”. Науково-дослідна робота. Х., 2017, державний реєстр 0101Y002243.

19. Тимчасова настанова з логістичного забезпечення бойових дій військових частин (підрозділів) Повітряних Сил Збройних Сил України: наказ Генерального штабу Збройних Сил України від 28.12.2019 № 494. К.: ГШ ЗС України, 2019.

20. Доктрина Об’єднана логістика: ВКП 4-00(01).01 : № 2861 / НВГШ від 24 вересня 2020 року. К. : ГШ ЗС України, 2020.

¹Oleksandr Hloba (PhD)

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

¹Vasyl Melnychenko (Candidate of Military Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-0598-9765>

²Andrii Skyba

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Ministry of Defence of Ukraine, Kyiv, Ukraine

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

The experience of the AAMF military units using as part of the air defense groups shows that the recovery level of anti-aircraft defense means does not respond the existing needs of the war. This emphasizes the urgency of finding ways to improve the recovery efficiency of WMT already today. The purpose of the article is to display the results of the efficiency's study of air defense systems recovery in a group of mixed-use air defense systems and to provide recommendations on improving the recovery efficiency during the air defense tasks conducting in the combat zone.

During the evaluation of the recovery efficiency of the WMT, the following internal factors were taken into account: the quantitative composition and qualification of the repair personnel, the presence of effective information support during the complex technological repair operations conducting, the provision of tools and materials necessary for the repair. The article can be useful for AAMF specialists, as well as all persons interested in the issues of WMT recovery in modern conditions of military operations.

Keywords: the group of anti-aircraft missile troops, weapons and military equipment, recovery, increasing of the recovery efficiency.

References

1. Holovnokomanduvach ZS Ukrainy. Ofitsiyni kanal v Telegram. URL: <https://t.me/CinCAFU>.

2. Heneralnyi shtab ZS Ukrainy. Ofitsiina storinka v Facebook. URL: <https://www.facebook.com/GeneralStaff.ua>.

3. Povitriani Syly ZS Ukrainy. Ofitsiyni kanal v Telegram. URL: <https://t.me/s/kpszs>.

4. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (sichen 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSh ZS Ukrainy, 2023. 168 s.

5. Voienno-istorychnyi opys rosiisko-ukrainskoi viiny (liutyi 2023 roku): viiskova publikatsiia / V. F. Zaluzhnyi, Ye. Moisiuk, S. Shaptala ta in. Kyiv: MOU; HSh ZS Ukrainy, 2023. 184 s.

6. Zastosuvannia syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (liutyi 2022 roku – lypen 2023 roku): navch. posib. / M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, V.P. Bryntseva. Kyiv : NUOU, 2024. 96 s.

7. Zastosuvannia syl ta zasobiv protypovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (serpen – hruden 2023 roku): navch. posib. /

B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, V. P. Bryntseva. Kyiv : NUOU, 2024. 103 s.

8. Zasoby protypovitrianoi ta protytraketnoi oborony Syl oborony Ukrainy. Inozemne ozbroiennia : navch. posib. / B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, O. V. Hloba., V. P. Bryntseva.; za zah. red. A. H. Saliia. K. : NUOU, 2024. 140 s.

9. Teoretychni osnovy materialno-tekhnichnoho zabezpechennia viisk (syl): navchalnyi posibnyk; za zah. red. V. O. Shuiekina. K.: TsNDI, 2010. 843 s.

10. Nakaz Heneralnoho shtabu Zbroinykh syl Ukrainy №213 vid 24 travnia 2016 roku “Pro zatverdzhennia Instruktzii z formuvannia operatyvno-stratehichnykh, operatyvno-taktychnykh ta zahalnykh vymoh do ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki Zbroinykh Syl Ukrainy”.

11. Metodyka vyboru variantiv vedennia tekhnichnoi rozvidky ta evakuatsii poskodzhennykh zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki v khodi vedennia boiovykh dii. Naukovo-doslidna robota. K.: NUOU, 2018.

12. Orhanizatsiia ekspluatatsii ta remontu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki zenitnykh raketnykh viisk: pidruchnyk za zah. red. A. V. Kryzhnogo, B. M. Lanetskoho. NUOU, 2018. 592 s.

13. V. V. Startsev. “Metodyky otsiniuvannia efektyvnosti

vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy". KhNUPS. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu viprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Vyp. №2 (12), 2022.

14. O. Sampir "Udoskonalena metodyka otsiniuvannia systemy vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky okremoi mekhanizovanoi bryhady". Journal of scientific papers "Social Development and Security", Vol. 11, Number 5, 2021.

15. Dovidnyk z protypovitrianoi oborony / A.Ia. Toropchyn, I.O. Romanenko, Yu.H. Danyk ta in. Kyiv: MO Ukrainy, Kharkiv: KhVU, 2003. 368 s. <https://elib.nuou.org.ua/katalog/dovidnyk-pvo.html>.

16. DSTU 2860-94. Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 1994.

17. DSTU V 15.602:2022. Systema rozroblennia i

postavlennia na vyrobnytstvo ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Remont ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Chastyna I. Osnovni polozhennia. Klasyfikatsiia. Kyiv: DP "Ukr NDNTs", 2023.

18. Tymchasove kerivnytstvo z orhanizatsii ta provedennia remontno-vidnovliuvalnykh robit na ozbroienni i viiskovoi tekhniky zenitnykh raketnykh viisk Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy". Naukovo-doslidna robota. Kh., 2017, derzhavnyi reiestr 0101Y002243.

19. Tymchasova nastanova z lohistychnoho zabezpechennia boiovykh dii viiskovykh chastyn (pidrozdiliv) Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy: nakaz Heneralnogo shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy vid 28.12.2019 № 494. K.: HSh ZS Ukrainy, 2019.

20. Doktryna Obiednana lohistyka: VKP 4-00(01).01 :№ 2861 / NVHSh vid 24 veresnia 2020 roku. K. : HSh ZS Ukrainy, 2020.

ПИТАННЯ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН (ПІДРОЗДІЛІВ) ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-96-105

УДК 623.48(477)

¹**Авраменко Олександр Васильович** (доктор технічних наук, доцент)

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

¹**Сарапін Юрій Олександрович**

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

¹**Яблонський Петро Михайлович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

²**Федоров Олексій Валерійович**

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

¹*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

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

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СИСТЕМИ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ОПОВІЩУВАННЯ НА ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ БОЄПРИПАСІВ (АВІАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ)

В роботі досліджено актуальне питання підвищення надійності систем пожежної сигналізації та оповіщення (СПСО) на об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження).

З використанням напівмарковського випадкового процесу побудовано математичну модель експлуатування СПСО, здійснено аналітичні розрахунки середнього часу перебування СПСО у справному стані, у будь-якому стані та частоти потрапляння випадкового процесу до різних станів, що дозволяє знайти значення коефіцієнта технічного використання з урахуванням різних параметрів експлуатування систем. Запропонований метод математичного моделювання передбачає застосування дифузійного немонотонного закону розподілу часу перебування СПСО у станах моделі. На основі отриманих аналітичних залежностей можливо знайти максимальне значення коефіцієнта технічного використання, що відповідатиме оптимальній періодичності технічного обслуговування СПСО.

Отримані в роботі результати можуть бути використані для розробки методики підвищення ефективності експлуатування СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності проведення їх ТО, що сприятиме підвищенню надійності СПСО на військових об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження) та в довгостроковій перспективі покращить рівень захисту цих об'єктів від виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

***Ключові слова:** надзвичайна ситуація, загроза, ризик, запобігання, відмова, технічне обслуговування, математична модель, закон розподілу.*

Вступ

Однією із основних цілей реалізації державної політики у військовій сфері, сфері оборони і військового будівництва є створення ефективної системи логістичного забезпечення військ (сил) та накопичення достатніх запасів матеріальних засобів, у тому числі ракет, боєприпасів, авіаційних засобів ураження та інших вибухових речовин (далі – боєприпаси), що відповідають потребам сил оборони. Важливими складовими елементами системи логістичного забезпечення військ (сил) є арсенали, центри, бази, склади, де

зберігаються боєприпаси (далі – військові об'єкти).

Міністерство оборони України (МОУ) є секторальним органом, що забезпечує зберігання боєприпасів [1].

Протягом останніх років, внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру (НСТХ) на військових об'єктах, було втрачено значну частину боєприпасів [2].

Проведений аналіз [2] свідчить, що переважна більшість НСТХ, що сталися на військових об'єктах, виникали внаслідок або із

супроводженням пожеж. Тобто загроза від пожеж на військових об'єктах очевидна.

Практичний досвід ліквідації НСТХ вказує, що процес гасіння пожеж на військових об'єктах можна умовно поділити на два етапи: перший – гасіння пожежі до початку вибухів боєприпасів, другий – гасіння пожежі, що супроводжується вибухами боєприпасів [3-4]. Другий етап характеризується значною кількістю ризиків та загроз, пов'язаних з вибухами, розлітанням на значну відстань осколків та снарядів, уражальною дією надлишкового тиску, що утворюється під час детонації боєприпасів, утворенням нових осередків пожеж, тощо. Тому завдання щодо ліквідації пожеж на першому етапі, до початку вибухів боєприпасів, є одним із основних для запобігання виникненню НСТХ.

Відомо, що одним із основних принципів побудови будь-якої системи безпеки, у тому числі і системи захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ, – є превентивність. Превентивність негативному впливу пожеж на військових об'єктах реалізується шляхом використання систем пожежної сигналізації та оповіщення (СПСО).

У системі МОУ передбачено, що на військових об'єктах усі місця зберігання боєприпасів обладнуються СПСО [5]. З урахуванням потенційної загрози від пожеж на військових об'єктах очевидно, що забезпечення справності та безвідмовності СПСО є одним із головних профілактичних заходів для мінімізації ймовірності переростання пожежі у НСТХ. Регулярні роботи, що передбачають перевірку працездатності СПСО, виконання регламентних і ремонтних робіт, підтримання експлуатаційної придатності СПСО, необхідні для підтримання системи у працездатному стані (далі – технічне обслуговування), сприяють швидкому виявленню та усуненню будь-яких проблем чи недоліків в роботі СПСО, зменшуючи ризик їх несправності під час критичної події. Проте, проведений аналіз вказує на значну кількість відмов СПСО, що експлуатуються на військових об'єктах, а також хибних сигналів, що надходять від них. Причому кількість відмов та хибних сигналів збільшується по мірі збільшення часу від проведення планових технічних обслуговувань (ТО) СПСО. З огляду на це, авторами робіт [6-9] зроблено припущення, що існуюча періодичність проведення ТО СПСО на військових об'єктах не є оптимальною. Тому існує необхідність у впровадженні науково обгрунтованої періодичності ТО СПСО, що сприятиме підвищенню надійності цих систем, а також, в цілому, підвищить рівень захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ.

Питанням підвищення надійності СПСО присвячено велику кількість наукових досліджень вітчизняних та закордонних вчених. Зокрема, роботи [10] та [11] присвячені визначенню шляхів удосконалення системи виявлення та ліквідації

НСТХ на військових об'єктах. У роботі [12] зосереджується увага на формуванні засад комплексного підходу до створення системи протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури від загорань і пожеж на початковій стадії розвитку. В публікаціях [13-16] зроблено акцент на ключовому значенні надійності та безвідмовності СПСО в частині запобігання колосальних соціально-економічних втрат. Робота [17] присвячена оцінці параметрів надійності СПСО. При цьому автор зосереджує увагу на важливості регулярного моніторингу технічного стану та ТО СПСО. Авторами робіт [18] та [19] досліджуються питання низької надійності СПСО в провідних країнах світу, у тому числі питання, пов'язані з надходженням від СПСО великої кількості хибних сигналів. Робота [20] присвячена аналізу технічної документації СПСО від різних виробників та побудові узагальнених номограм технічних характеристик елементів цих систем з метою формування основи для створення “еталонного зразка СПСО”, що відповідатиме необхідному рівню надійності.

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що, не зважаючи на достатньо велику кількість досліджень в напрямку удосконалення ефективності експлуатування та підвищення надійності СПСО, актуальним завданням є пошук нових ефективних шляхів підвищення надійності СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності їх ТО.

Метою статті є розробка загальних положень методики підвищення ефективності експлуатування СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності проведення їх ТО.

Матеріали та методи

Для досягнення визначеної у статті мети використано такі методи дослідження: теоретичний аналіз – для аналізу об'єкта досліджень із системних позицій, визначення цілей його функціонування; порівняння – для встановлення подібності та/або відмінності між різними СПСО за певними ознаками, а також встановлення загального, притаманного для усіх СПСО; дедуктивний та індуктивний методи – під час дослідження надійності СПСО; формалізації – під час постановки задачі обгрунтування оптимальної періодичності проведення ТО; математичного моделювання – у ході розроблення математичної моделі експлуатування СПСО для проведення розрахунково-теоретичного дослідження впливу визначальних параметрів на ймовірність безвідмовної роботи СПСО; чисельний метод – під час побудови залежностей коефіцієнта технічного використання від досліджуваних параметрів експлуатування СПСО; графо-аналітичний метод – при побудові графічних залежностей.

Результати

У виробках електронної техніки, якими є СПСО, спостерігається немонотонний характер

змінювання деяких фізичних параметрів. Деградацію таких виробів прийнято розглядати як процес з немонотонними реалізаціями [21]. Серед типових завдань надійності, що вирішуються з використанням моделей відмов, дифузійний немонотонний розподіл (DN - розподіл) є єдиною моделлю, яка дозволяє вирішувати усі перелічені у [21] завдання надійності. Тому для СПСО за модель відмов найбільш доцільно використовувати саме DN - розподіл.

Під експлуатуванням СПСО розуміють стадію життєвого циклу, під час якого СПСО технічно готова до застосування за призначенням (рис. 1). Важливим завданням на цьому етапі є підтримання експлуатаційної придатності СПСО, під яким розуміють комплекс заходів, спрямованих на утримання системи в технічному стані, що забезпечує можливість застосування її за призначенням починаючи з уведення в експлуатацію до кінця експлуатування [22].

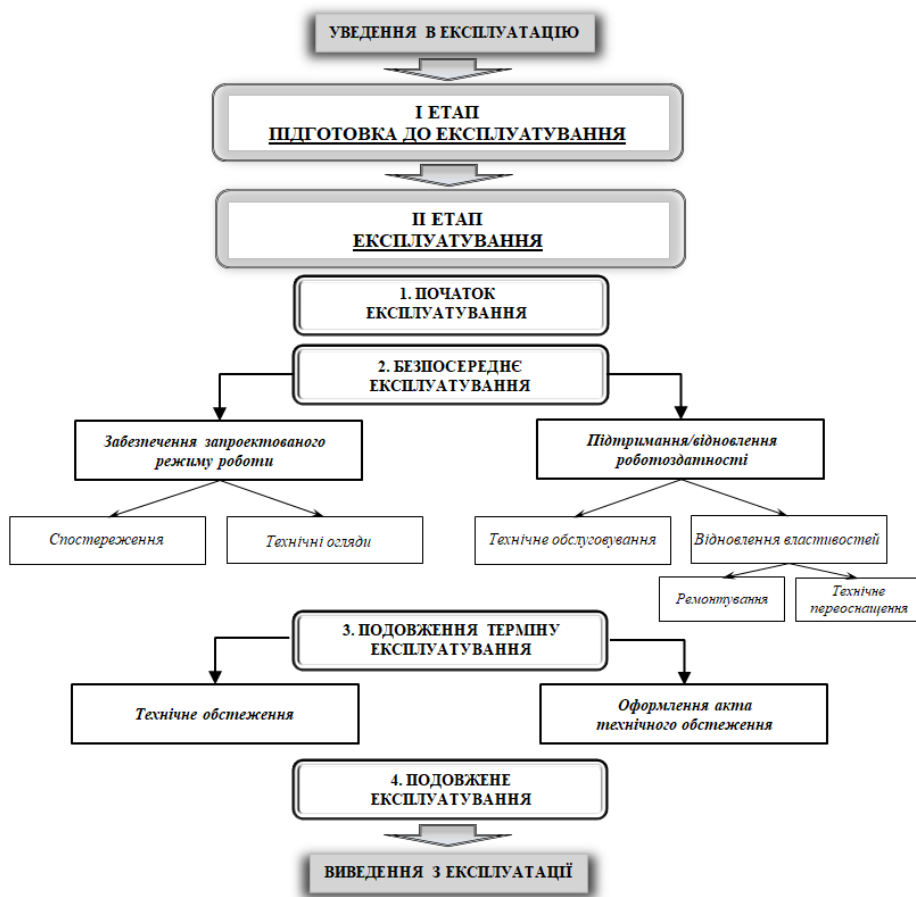


Рисунок 1. Схема експлуатації СПСО

На основі [21] та [23], з досвіду експлуатування СПСО на військових об'єктах, під параметрами математичної моделі експлуатування СПСО розуміються: періодичність проведення профілактичних заходів (ТО) та перевірки технічного стану ручною системою контролю (РСК) – T , год; тривалість виконання профілактичних заходів (ТО) – $t_{пз}$, год; тривалість контролю СПСО РСК – $t_{рск}$, год; тривалість контролю СПСО автоматизованою системою контролю (АСК) – $t_{аск}$, год; тривалість повного відновлення СПСО – $t_{в}$, год; інтенсивність надходження хибних сигналів про відмови СПСО – λ_x , 1/год; інтенсивність проявлення прихованих відмов СПСО – $\lambda_{пр}$, 1/год; вірогідність виявлення відмови СПСО РСК – $d_{рск}$; вірогідність виявлення відмови СПСО АСК – $d_{аск}$; вірогідність правильного визначення справногo стану СПСО АСК – $d_{аск}^{сc}$;

імовірність надходження сигналу про відмову СПСО від АСК – ρ .

Стохастичний граф станів та переходів моделі експлуатування СПСО (рис. 2), враховує можливі стани, в яких перебуває система, а саме: S_1 – використання СПСО за призначенням у технічно справному стані, контроль справності здійснюється АСК; S_2 – проведення планових профілактичних заходів із перевіркою технічного стану СПСО з використанням РСК, причому в СПСО відмови немає; S_3 – виконання перевірки технічного стану СПСО АСК після фіксування у випадковий момент τ_x сигналу помилкової тривоги (хибної відмови); S_4 – повне відновлення справності СПСО (у тому числі усунення причини відмови або причини хибної відмови); S_5 – виконання перевірки технічного стану СПСО АСК після фіксування у випадковий момент τ сигналу тривоги (виявлення відмови); S_6 – проведення перевірки технічного

стану СПСО з використанням РСК під час проведення планових профілактичних заходів (в СПСО наявна відмова, що не була виявлена АСК); S_7 – використання СПСО за призначенням при наявності невиявленої (прихованої) відмови.

Кожен із зазначених станів, в яких може перебувати СПСО в період безпосереднього експлуатування, умовно розподілені за рівнями захищеності військового об'єкта в залежності від перебування СПСО в тому чи іншому стані (рис. 2). Під захищеністю військового об'єкта в роботі мається на увазі неможливість такого розвитку подій, при якому СПСО не виконає свої функції, що в результаті призведе до виникнення НСТХ на військовому об'єкті.

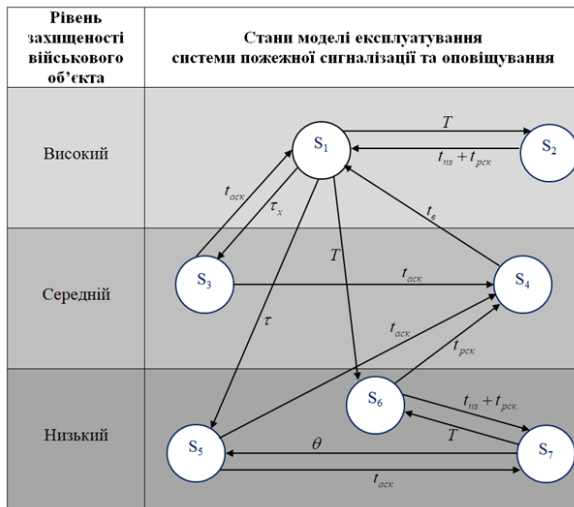


Рисунок 2. Стохастичний граф станів та переходів моделі експлуатування СПСО

Так, перебування СПСО в станах S_1 або S_2 забезпечує високий рівень захищеності військового об'єкта. Високий рівень захищеності характеризується відсутністю відмов в роботі СПСО, у тому числі хибних чи прихованих.

Середній рівень захищеності військового об'єкта можливий за умов перебування СПСО у станах S_3 або S_4 . Цей рівень захищеності характеризується наявністю хибної відмови в роботі СПСО або відмови, причина якої встановлена, при цьому вживаються заходи для її усунення, відновлення справності СПСО (переходу до стану S_1) та повернення військового об'єкта до високого рівня захищеності.

При низькому рівні захищеності військового об'єкта СПСО перебуває у станах S_5 , або S_6 , або S_7 . Тобто в роботі СПСО наявні відмови, причини яких не встановлені, або в роботі СПСО наявні невиявлені (приховані) відмови. При цьому заходи щодо "повернення" СПСО до справного стану S_1 не проводяться.

Також на рис. 2 показано напрями переходів з одного стану в інший із зазначенням часу перебування СПСО у стані S_i , $i = \overline{1,7}$. При цьому використані такі умовні позначення: τ – випадковий момент виникнення відмови СПСО на

інтервалі часу $[0, T]$; τ_x – випадковий момент виникнення хибної відмови на інтервалі часу $[0, T]$; θ – випадковий момент проявлення прихованої відмови СПСО, що була пропущена під час перевірки АСК або РСК.

Для наочної демонстрації моделі та зручності графічного відображення досліджуваних випадкових процесів зроблено припущення, що у початковий момент часу t_0 , СПСО знаходиться у стані S_1 , тобто технічно справна.

Наведений на рис. 3 приклад демонструє періодичне перебування СПСО у різних станах протягом періоду експлуатування, зокрема, в станах проведення планових перевірок, профілактичних заходів (ТО), технічної несправності внаслідок відмов, хибних тривог тощо.

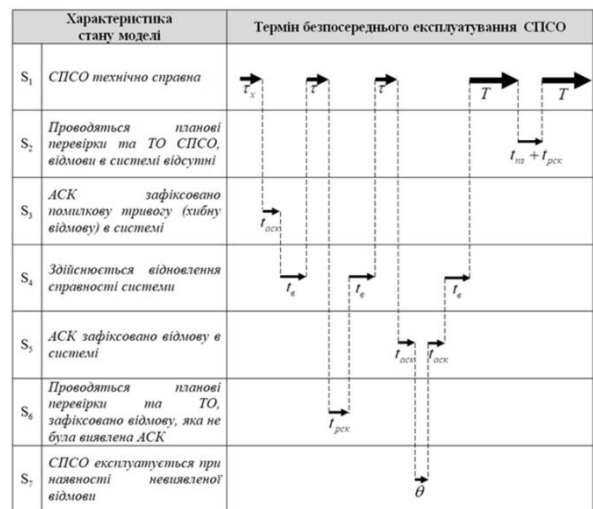


Рисунок 3. Схема реальної системи експлуатування СПСО (приклад)

Звісно, що наведений приклад реалізації випадкових процесів в системі експлуатування СПСО містить певну кількість припущень. Але такий підхід дає змогу використати апарат напівмарковського випадкового процесу для отримання корисних знань, що стосуються підвищення ефективності захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ.

Напівмарковські процеси дозволяють більш гнучко моделювати ситуації, де переходи між станами можуть бути більш складними та варіативними, ніж у класичних марковських процесах.

Однією із особливостей переходів системи експлуатування СПСО з одного стану в інший є те, що ці переходи відбуваються миттєво. Напівмарковський випадковий процес визначається матрицею перехідних ймовірностей та матрицею функцій розподілу тривалості переходу зі станів $i = \overline{1,7}$ до станів $j = \overline{1,7}$ якщо відомий початковий стан випадкового процесу.

З урахуванням властивостей напівмарковського випадкового процесу, для того щоб спростити подальші розрахунки, зроблено певні обмеження, припущення, та вважається що: величини T , $t_{в}$, $t_{рск}$,

$t_{аск}$, $t_{в}$, використані в математичній моделі (рис. 2), не є випадковими; справедливим є DN -розподіл відмов СПСО; справедливим є експоненціальний закон розподілу часу надходження сигналів хибних тривог СПСО; справедливим є експоненціальний закон розподілу сигналів проявлення відмов, що відбулися в СПСО; здійснюється повне відновлення СПСО після виявлення відмови в системі експлуатування; відмови в роботі СПСО не пов'язані з виникненням пожеж, аварій, катастроф, надзвичайних ситуацій, терактів тощо.

Критерієм ефективності ТО СПСО є один із комплексних показників надійності – коефіцієнт технічного використання ($K_{ТВ}$), який представлено як відношення математичного сподівання сумарного часу перебування СПСО у працездатному стані за деякий період експлуатування до математичного сподівання сумарного часу перебування СПСО в працездатному стані та у простоях, зумовлених ТО і ремонтом за той самий період [23].

Іншими словами, $K_{ТВ}$ представляє собою відношення середнього часу перебування системи в

справному стані до календарного часу експлуатування. Оптимальна періодичність проведення ТО СПСО повинна забезпечувати максимальне значення $K_{ТВ}$.

Для запропонованої математичної моделі експлуатування СПСО, з урахуванням [24], значення $K_{ТВ}$ представлено у наступному вигляді:

$$K_{ТВ} = \frac{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \varphi_{s_i}(T)}{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \eta_i(T)} \quad (1)$$

де $\varphi_{s_i}(T)$ – середній час перебування СПСО справною у стані S_i ;

$\eta_i(T)$ – середній час перебування СПСО у будь-якому стані $i = \overline{1,7}$;

$\pi_i(T)$ – частота потрапляння випадкового процесу до стану $i = \overline{1,7}$.

Для побудованої моделі експлуатування СПСО розраховано матрицю перехідних імовірностей напівмарковського процесу та матрицю функцій розподілу часу перебування випадкового процесу у станах напівмарковського процесу:

$$P(T) = \begin{vmatrix} 0 & (1-F(T))e^{-\lambda_x T} & \lambda_x \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt & 0 & \rho \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & (1-\rho) \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{аск}^{cc} & 0 & 0 & 1-d_{аск}^{cc} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{аск} & 0 & 0 & 1-d_{аск} \\ 0 & 0 & 0 & d_{рск} & 0 & 0 & 1-d_{рск} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-e^{-\lambda_{пр} T} & e^{-\lambda_{пр} T} & 0 \end{vmatrix} \quad (2)$$

При цьому:

$$P_{1j}(T) = P_{12}(T) + P_{13}(T) + P_{15}(T) + P_{16}(T) = 1.$$

В матриці (2) використані такі позначення:

$F(T)$ – функція розподілу часу безвідмовної роботи СПСО;

T – періодичність проведення профілактичних заходів (ТО) та перевірки технічного стану РСК;

λ_x – інтенсивність надходження помилкових тривог та хибних сигналів про відмови СПСО;

$\lambda_{пр}$ – інтенсивність проявлення прихованих відмов СПСО;

$d_{рск}$ – вірогідність виявлення відмови СПСО РСК;

$d_{аск}$ – вірогідність виявлення відмови СПСО АСК;

$d_{аск}^{cc}$ – вірогідність правильного визначення справного стану СПСО АСК;

ρ – ймовірність надходження сигналу про відмову СПСО від АСК.

$$F_{ij}(T) = \begin{vmatrix} 0 & T & \int_0^t e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt & 0 & \int_0^t e^{-\lambda_x t} dF(t) & T & 0 \\ \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt & \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & 0 & \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & 0 & 0 \\ 1(t_{пз}+t_{рск}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1(t_{аск}) & 0 & 0 & 1(t_{аск}) & 0 & 0 & 0 \\ 1(t_{в}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1(t_{аск}) & 0 & 0 & 1(t_{аск}) \\ 0 & 0 & 0 & 1(t_{рск}) & 0 & 0 & 1(t_{пз}+t_{рск}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\int_0^t e^{-\lambda_{пр} t} dt}{\int_0^T e^{-\lambda_{пр} t} dt} & T & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

У матриці (3) використані такі позначення:

$t_{пз}$ – тривалість виконання профілактичних заходів (ТО) СПСО;

$t_{рск}$ – тривалість контролю СПСО РСК;

$t_{аск}$ – тривалість контролю СПСО АСК;

$t_{в}$ – тривалість повного відновлення СПСО.

З урахуванням функції Лапласа, функція розподілу часу напрацювання СПСО на відмову для DN - розподілу має такий вигляд:

$$F(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu\cdot t}}\right) + e^{2\cdot v^2} \cdot \Phi\left(-\frac{t+\mu}{v\sqrt{\mu\cdot t}}\right) \quad (4)$$

де μ – параметр масштабу; v – параметр форми.

Середній час перебування СПСО справною у стані S_1 :

$$\varphi_{s_1}(T) = M\{\min(\tau, \tau_x)\} \quad \Delta(t) = 1 - e^{-\lambda_x t}$$

$$\varphi_{s_1}(T) = \int_0^T (1-F(t)) \cdot (1-\Delta(t)) dt$$

$$F_{ij}(T) = \left| \begin{array}{c} P_{12}(T) \cdot T + P_{13}(T) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{13}(t) + P_{15}(T) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{15}(t) + P_{16}(T) \cdot T \\ t_{пз} + t_{рск} \\ t_{аск} \\ t_{в} \\ t_{аск} \\ d_{рск} \cdot t_{рск} + (1-d_{рск}) \cdot (t_{пз} + t_{рск}) \\ \frac{1-e^{-\lambda_{пр} \cdot T}}{\lambda_{пр}} \end{array} \right| \quad (6)$$

Значення стаціонарних ймовірностей вкладеного ланцюга Маркова знаходяться як рішення системи з алгебраїчних рівнянь:

$$\pi(T)_i = \sum_{j=1}^N (\pi(T)_j \cdot P(T)_{ji})$$

Таким чином, система рівнянь у матричному вигляді буде:

$$\pi(T) = \left| \begin{array}{c} \pi(T)_2 + \pi(T)_3 \cdot d_{аск}^{cc} + \pi(T)_4 \\ \pi(T)_1 \cdot [(1-F(T))e^{-\lambda_x T}] \\ \pi(T)_1 \cdot \left[\lambda_x \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt \right] \\ \pi(T)_3 \cdot (1-d_{аск}^{cc}) + \pi(T)_5 \cdot d_{аск} + \pi(T)_6 \cdot d_{рск} \\ \pi(T)_1 \cdot \left(\rho \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) \right) + \pi(T)_7 \cdot (1-e^{-\lambda_{пр} T}) \\ \pi(T)_1 \cdot \left((1-\rho) \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) \right) + \pi(T)_7 \cdot e^{-\lambda_{пр} T} \\ \pi(T)_5 \cdot (1-d_{аск}) + \pi(T)_6 \cdot (1-d_{рск}) \end{array} \right|$$

із умовою нормування:

$$\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$$

Для спрощення запису введено позначення:

$$\begin{aligned} c_1(T) &= (1-F(T))e^{-\lambda_x T}; \\ c_2(T) &= (1-\rho) \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t); \\ c_3(T) &= \lambda_x \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt; \\ c_4(T) &= \rho \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t); \\ c_5(T) &= 1 - e^{-\lambda_{пр} T}; \end{aligned}$$

або

$$\varphi_{s_1}(T) = \int_0^T (1-F(t)) \cdot e^{-\lambda_x t} dt \quad (5)$$

Решта $\varphi_i(t)$ для $i=2,3,\dots,7$ дорівнюють нулю, так як СПСО в цих станах в повній мірі не використовується або перебуває в несправному стані.

Розрахунок матриці середніх тривалостей перебування в станах напівмарковського процесу має вигляд:

$$c_6(T) = e^{-\lambda_{пр} T}$$

Тоді матриця запишеться так:

$$\pi(T) = \left| \begin{array}{c} \pi(T)_2 + \pi(T)_3 \cdot d_{аск}^{cc} + \pi(T)_4 \\ \pi(T)_1 \cdot c_1(T) \\ \pi(T)_1 \cdot c_3(T) \\ \pi(T)_3 \cdot (1-d_{аск}^{cc}) + \pi(T)_5 \cdot d_{аск} + \pi(T)_6 \cdot d_{рск} \\ \pi(T)_1 \cdot c_4(T) + \pi(T)_7 \cdot c_5(T) \\ \pi(T)_1 \cdot c_2(T) + \pi(T)_7 \cdot c_6(T) \\ \pi(T)_5 \cdot (1-d_{аск}) + \pi(T)_6 \cdot (1-d_{рск}) \end{array} \right| \quad (7)$$

із умовою нормування:

$$\pi(T)_1 + \pi(T)_2 + \pi(T)_3 + \pi(T)_4 + \pi(T)_5 + \pi(T)_6 + \pi(T)_7 = 1$$

Знайдемо залежності π_1 від π_7 та π_7 від π_1 та запишемо кінцеві вирази для π_1 та π_7 :

$$\pi_1 = [c_6 \cdot d_{рск} + c_5 \cdot d_{аск}^{cc}] / [1 - c_1 - c_3 + c_5 + c_6 - c_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot c_6 - c_3 \cdot c_5 - c_3 \cdot c_6 - c_2 \cdot d_{рск} + 2 \cdot c_6 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск} + 2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_2 \cdot c_5 \cdot d_{рск} + c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_4 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_4 \cdot c_6 \cdot d_{аск} - c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} \cdot d_{аск}^{cc} - c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} \cdot d_{аск}^{cc}];$$

$$\pi_7 = [1 - c_1 - c_3 - c_2 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск}] / [1 - c_1 - c_3 + c_5 + c_6 - c_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot c_6 - c_3 \cdot c_5 - c_3 \cdot c_6 - c_2 \cdot d_{рск} + 2 \cdot c_6 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск} + 2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_2 \cdot c_5 \cdot d_{рск} + c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_4 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} + c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_4 \cdot c_6 \cdot d_{аск} - c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} \cdot d_{аск}^{cc} - c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} \cdot d_{аск}^{cc}].$$

Для спрощення введемо додаткові позначення:

$$A = c_6 \cdot d_{рск} + c_5 \cdot d_{аск}^{cc};$$

$$B = 1 - c_1 - c_3 + c_5 + c_6 - c_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot c_6 - c_3 \cdot c_5 - c_3 \cdot c_6 - c_2 \cdot d_{рск} + 2 \cdot c_6 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск} + 2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_2 \cdot c_5 \cdot d_{рск} + c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_4 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} + c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_4 \cdot c_6 \cdot d_{аск} - c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} \cdot d_{аск}^{cc} - c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} \cdot d_{аск}^{cc}.$$

Тоді:

$$\pi_1 = \frac{A}{B}$$

$$\pi_7 = \frac{1-c_1-c_3-c_2 \cdot d_{\text{рск}} - c_4 \cdot d_{\text{аск}}}{B}$$

Підставляючи знайдені вирази для π_1 та π_7 в систему рівнянь (7), отримаємо кінцеве рішення:

$$\pi(T) = \begin{pmatrix} \frac{A(T)}{B(T)} \\ c_1(T) \cdot \frac{A(T)}{B(T)} \\ c_3(T) \cdot \frac{A(T)}{B(T)} \\ \pi(T)_3 \cdot (1-d_{\text{аск}}) + \pi(T)_5 \cdot d_{\text{аск}} + \pi(T)_6 \cdot d_{\text{рск}} \\ c_4(T) \cdot \frac{A(T)}{B(T)} + c_5(T) \cdot \pi(T)_7 \\ \pi(T)_1 \cdot c_2(T) + \pi(T)_7 \cdot c_6(T) \\ \pi(T)_5 \cdot (1-d_{\text{аск}}) + \pi(T)_6 \cdot (1-d_{\text{рск}}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Після підстановки у рівняння (1) значення $\varphi_{s_1}(T)$, $\eta(T)$ та $\pi(T)$ із формул (5), (6) та (8),

застосувавши при цьому вираз (4) для функції розподілу часу напрацювання СПСО на відмову для DN-розподілу, розраховується $K_{\text{ТВ}}$ для запропонованої математичної моделі експлуатування СПСО.

Обговорення

В рамках виконання завдання з підвищення надійності СПСО на військових об'єктах шляхом визначення оптимальної періодичності їх ТО, розроблено математичну модель експлуатування СПСО з використанням DN-розподілу наробітку на відмову, яка дозволяє розрахувати найвище значення $K_{\text{ТВ}}$, що відповідає оптимальній періодичності проведення ТО СПСО.

Отримані результати дозволяють графічно відобразити залежності значення $K_{\text{ТВ}}$ від параметрів математичної моделі експлуатування СПСО. При проведенні розрахунків значень функції DN-розподілу наробітку СПСО на відмову використано функцію Лапласа (рис. 4).

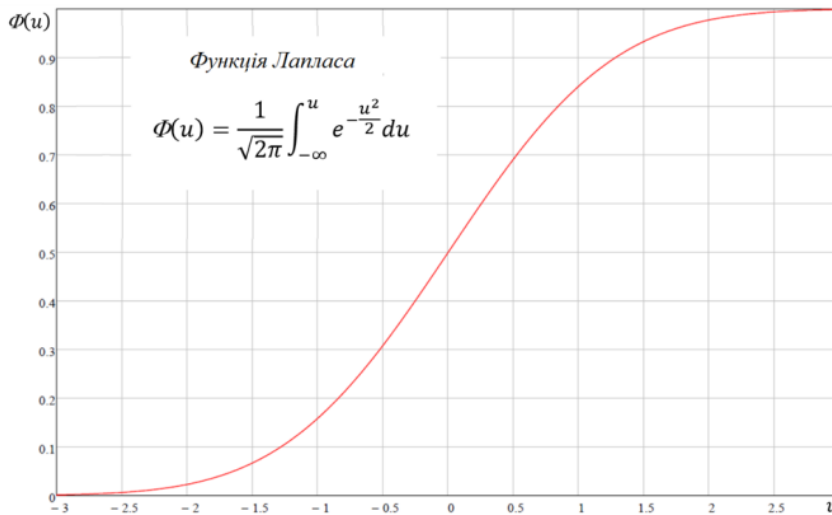


Рисунок 4. Вигляд функції Лапласа $\Phi(u)$, що використовується при розрахунку значень функції DN-розподілу наробітку СПСО на відмову

На рис. 5 наведено вигляд функції DN-розподілу $F(t)$, що використовується для моделювання наробітку СПСО на відмову при параметрі форми $v = 0,75$ (згідно [24]), різних значеннях параметру

масштабу μ та різних часових показниках, що відповідають періодичності проведення профілактичних заходів (ТО) та перевірки технічного стану СПСО РСК.

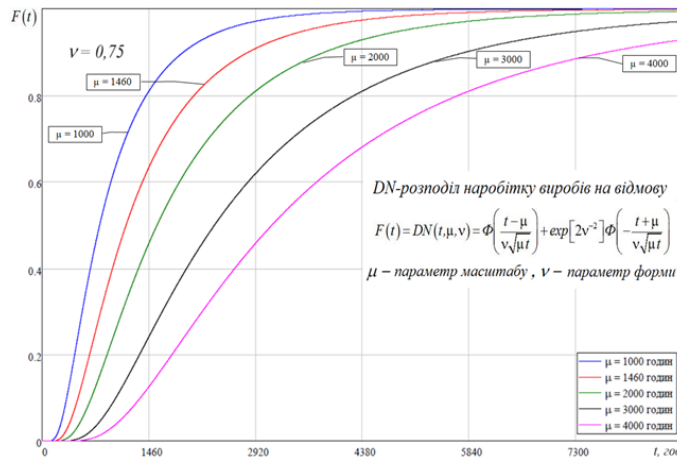


Рисунок 5. Вигляд функції DN-розподілу $F(t)$, що використовується для моделювання наробітку СПСО на відмову

При цьому вигляд щільності ймовірності DN -розподілу $f(t)$ (рис. 6) вказує на більше її значення при меншому проміжку часу між відмовами.

Тобто при зниженні рівня надійності СПСО щільність розподілу сягатиме більшого значення.

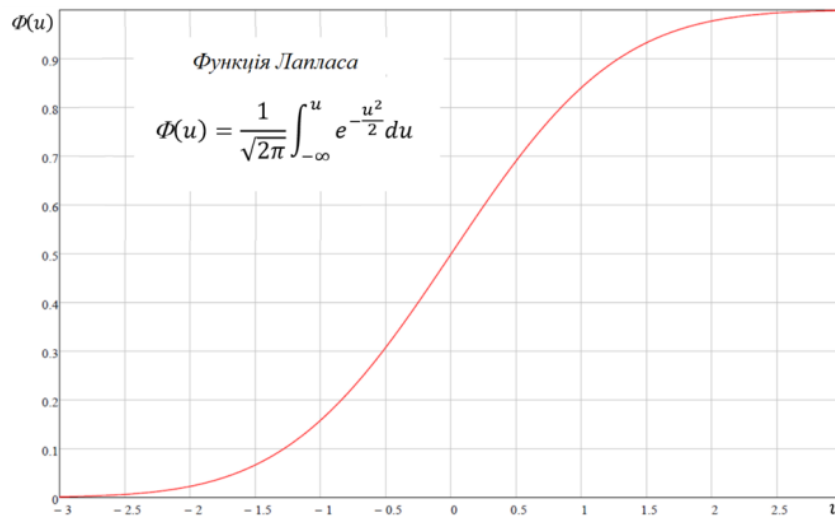


Рисунок 6. Вигляд щільності ймовірності DN -розподілу $f(t)$, що використовується для моделювання наробітку СПСО на відмову

Висновки

Результати розрахунків, у тому числі ті, що отримані графо-аналітичним методом, відповідають фізичному змісту та свідчать про адекватність математичної моделі експлуатування СПСО. Ці результати ляжуть в основу методики підвищення ефективності експлуатування СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності проведення їх ТО. Проведення ТО СПСО з оптимальною періодичністю сприятиме підвищенню надійності цих систем, що в довгостроковій перспективі підвищить рівень захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ.

Список використаних джерел

- Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.10.2020 р. № 1109. Офіційний вісник України. 2020. № 93. С. 9.
- Авраменко О.В., Іванов В.І., Сарапін Ю.О., Федоров О.В. Підвищення ефективності захисту об'єктів зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження) від виникнення надзвичайних ситуацій шляхом удосконалення умов зберігання. Науково-практичний журнал "Повітряна міць України". Київ: НУОУ. 2023. № 2 (5). С. 51-56.
- Аветисян В.Г., Сенчихін Ю.М. Обґрунтування вихідних даних для розрахунку сил та засобів пожежогасіння на об'єктах з наявністю боєприпасів та вибухових речовин. Збірник наукових праць "Проблеми надзвичайних ситуацій". Харків: НУЦЗУ. 2018. № 27. С. 3-9.
- Убайдуллаєв Ю.Н., Гаврилюк А.О., Полтораченко А.І. Моделювання розвитку надзвичайної ситуації на арсеналах, базах, складах зберігання боєприпасів. Збірник наукових праць "Управління розвитком складних систем". Київ: КНУБА. 2019. № 37. С. 60-65.
- Про затвердження Переліку об'єктів Міністерства оборони України та Збройних Сил України, які підлягають обладнанню системами протипожежного захисту: наказ Міністерства оборони України від 21.12.2017 р. № 690.

6. Авраменко О.В., Поліщук В.В., Сарапін Ю.О. Підвищення ефективності захисту об'єктів зберігання боєприпасів від надзвичайних ситуацій шляхом впровадження обґрунтованої періодичності технічного обслуговування систем протипожежного захисту. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-22 берез. 2023 р. Київ, 2023. С. 10-13.

7. Іванов В.І., Сарапін Ю.О. Підвищення живучості об'єктів зберігання авіаційних засобів ураження шляхом впровадження обґрунтованої періодичності технічного обслуговування систем протипожежного захисту. Новітні технології – для захисту повітряного простору: зб. тез доп. XIX міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квіт. 2023 р. Харків, 2023. С. 382-383.

8. Дуленко Д.І., Сарапін Ю.О. Підвищення рівня цивільної безпеки на об'єктах зберігання боєприпасів. Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки: зб. тез доп. III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 29 квіт. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 41.

9. Авраменко О.В., Сарапін Ю.О., Яблонський П.М. Підвищення ефективності експлуатації систем пожежної сигналізації та оповіщення шляхом визначення оптимальної періодичності їх технічного обслуговування. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 28-30 трав. 2024 р. Київ, 2024. С. 177-179.

10. Важинський С.Е., Федюк І.Б., Чернуха А.М. Вдосконалення протипожежного захисту місць зберігання боєприпасів та вибухових речовин. Збірка наукових праць. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ. 2021. № 1 (33). С. 278-289.

11. Савченко О.В., Стецюк Є.І., Островерх О.О., Іванець Г.В. Обґрунтування використання гелеутворюючих систем для запобігання надзвичайних ситуацій на складах зберігання артилерійських боєприпасів. Збірка наукових праць. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ. 2015. № 22.

12. Жартовський С.В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об'єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із

целюлозовмісних матеріалів. Науковий вісник НЛТУ. Львів: НЛТУ. 2017. № 10. С. 101–105.

13. Yadav V., Mulani A., Deshmene D., Kalburgi B. 360 Degree Rotating Fire Protection System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol. 3. No 12. P. 133–138.

14. Suralaga F.A., Sari N., Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No 1. P. 143–155.

15. Wang Y., Tan H. Design and implementation of a distributed fire monitoring and alarm system based on LoRa. Journal of Physics:Conference Series. 2023. No 2674.

16. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penyebab terjadi false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknika. 2024. Vol. 9. No 1. P.79–88.

17. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No 57. P. 2036–2040.

18. Pietrzak M., Chmiel M., Feltynowski M. Analysis of the Problem of False Fire Alarms Generated by Fire Alarm Systems in Poland and Other Selected Countries. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 118–132.

19. Marzec M., Kuskowski J. False Alarms in the Decision Support System of the State Fire Service. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 134–145.

20. Terletsyky T., Kaidyk O., Tkachuk A., Zabolotnyi O., Caganova D. Ensuring the reliability of functioning of non-addressed fire alarm. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2021. Vol. 9. No 37.

21. ДСТУ 3433-96:1996. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ: Інститут проблем надійності машин і споруд, 1996. 42 с.

22. ДСТУ 9047:2020. Системи протипожежного захисту. Настанова з підтримання експлуатаційної придатності. [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2020. 42 с.

23. ДСТУ 2860-94:1994. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Інститут проблем надійності машин і споруд, 1994. 34 с.

24. ДСТУ 2862-94:1994. Методи розрахунку показників надійності. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1994. 39 с.

¹**Oleksandr Avramenko** (Doctor of Technical Sciences)

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

¹**Yurii Sarapin**

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

¹**Petro Yablonskyi** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

²**Oleksiy Fedorov**

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

¹*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

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

DETERMINATION OF THE OPTIMUM PERIODICITY OF MAINTENANCE OF THE FIRE ALARM SYSTEM AND NOTIFICATION AT MILITARY STORAGE FACILITIES OF AMMUNITION (AVIATION ATTACK MEANS)

The work examines the topical issue of increasing the reliability of fire alarm and warning systems (FALS) at ammunition storage facilities (aviation weapons). Using a semi-Markov random process, a mathematical model of the operation of FALS was built, analytical calculations of the average time the system is in a working condition, in any condition, and the frequency of the random process entering different states, which allows to find the value of the coefficient of technical use, taking into account various operating parameters of FALS.

The proposed method of mathematical modeling involves the application of the diffusion non-monotonic law of distribution of the time of stay of FALS in the states of the model. Based on the obtained analytical dependencies, it is possible to find the maximum value of the coefficient of technical use, which will correspond to the optimal frequency of maintenance of FALS.

The results obtained in the work can be used to develop a methodology for increasing the efficiency of FALS operation by determining the optimal periodicity of their maintenance, which will contribute to increasing the reliability of FALS at military storage facilities for ammunition (aviation weapons) and, in the long term, will improve the level of protection of these facilities objects from the occurrence of man-made emergency situations.

Keywords: *emergency situation; threat; risk; prevention; refusal; maintenance; mathematical model; distribution law.*

References

1. Some issues of critical infrastructure facilities: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 9, 2020 No. 1109. Official Gazette of Ukraine. 2020. No. 93. P. 9.

2. Avramenko O.V., Ivanov V.I., Sarapin Yu.O., Fedorov O.V. Increasing the effectiveness of the protection of ammunition storage facilities (aviation weapons) against

emergency situations by improving storage conditions. Scientific and practical journal “Air Power of Ukraine”. Kyiv: NUOU. 2023. No. 2 (5). P. 51-56.

3. Avetisyan V.G., Senchikhin Yu.M. Justification of the initial data for the calculation of forces and means of fire extinguishing at objects with the presence of ammunition and explosives. Collection of scientific works “Problems of emergency situations”. Kharkiv: NUTSZU. 2018. No. 27. P. 3–9.

4. Ubaidullaev Y.N., Gavrilyuk A.O., Poltorachenko A.I. Modeling the development of an emergency situation at arsenals, bases, ammunition storage warehouses. Collection of scientific works "Management of development of complex systems". Kyiv: KNUBA. 2019. No. 37. P. 60–65.
5. On approval of the List of objects of the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine that are subject to being equipped with fire protection systems: order of the Ministry of Defense of Ukraine dated 21.12.2017. No. 690.
6. Avramenko O.V., Polishchuk V.V., Sarapin Yu.O. Increasing the effectiveness of the protection of ammunition storage facilities against emergency situations by implementing reasonable periodicity of technical maintenance of fire protection systems. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph: coll. theses add. international science and practice conference, Kyiv, March 21–22, 2023. Kyiv, 2023. P. 10–13.
7. Ivanov V.I., Sarapin Yu.O. Increasing the survivability of aviation weapons storage facilities by implementing reasonable periodicity of maintenance of fire protection systems. The latest technologies – for the protection of air space: coll. theses add. XIX International of science conference, Kharkiv, April 12–13, 2023. Kharkiv, 2023. P. 382–383.
8. Dulenko D.I., Sarapin Yu.O. Increasing the level of civil security at ammunition storage facilities. Modern problems of professional and civil safety: coll. theses add. III International science and practice internet conference, Dnipro, April 29, 2024. Dnipro, 2024. P. 41.
9. Avramenko O.V., Sarapin Yu.O., Yablonskyi P.M. Increasing the efficiency of operation of fire alarm and notification systems by determining the optimal periodicity of their maintenance. Actual problems and innovative technologies in the field of civil defense and environmental security for the post-war recovery of Ukraine: coll. of science works of international science and practice conference, Kyiv, May 28–30, 2024. Kyiv, 2024. P. 177–179.
10. Vazhynskyi S.E., Fedyuk I.B., Chernukha A.M. Improvement of fire protection of storage places of ammunition and explosives. Collection of scientific papers. Problems of emergency situations. Kharkiv: NUTSZU. 2021. No. 1 (33). P. 278–289.
11. Savchenko O.V., Stetsyuk E.I., Ostroverkh O.O., Ivanets G.V. Justification of the use of gel-forming systems to prevent emergency situations in artillery ammunition storage warehouses. Collection of scientific papers. Problems of emergency situations. Kharkiv: NUTSZU. 2015. No. 22.
12. Zhartovsky S.V. Problematic issues of creating a fire protection system of a critical infrastructure object with a fire load made of cellulose-containing materials. Scientific Bulletin of NLTU. Lviv: NLTU. 2017. No. 10. P. 101–105.
13. Yadav V., Mulani A., Deshmane D., Kalburgi B. 360 Degree Rotating Fire Protection System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol. 3. No. 12. P. 133–138.
14. Suralaga F.A., Sari N., Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No. 1. P. 143–155.
15. Wang Y., Tan H. Design and implementation of a distributed fire monitoring and alarm system based on LoRa. Journal of Physics: Conference Series. 2023. No. 2674.
16. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penebaya peridahan false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknika. 2024. Vol. 9. No. 1. P. 79–88.
17. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No. 57. P. 2036–2040.
18. Pietrzak M., Chmiel M., Feltynowski M. Analysis of the Problem of False Fire Alarms Generated by Fire Alarm Systems in Poland and Other Selected Countries. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No. 2. P. 118–132.
19. Marzec M., Kuskowski J. False Alarms in the Decision Support System of the State Fire Service. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No. 2. P. 134–145.
20. Terletsykyi T., Kaidyk O., Tkachuk A., Zabolotnyi O., Caganova D. Ensuring the reliability of functioning of non-addressed fire alarm. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2021. Vol. 9. No. 37.
21. DSTU 3433-96:1996. Reliability of equipment. Failure models. Basic provisions. [Effective from 1999-01-01]. View. officer Kyiv: Institute of reliability problems of machines and structures, 1996. 42 p.
22. DSTU 9047:2020. Fire protection systems. Instruction on maintenance of operational suitability. [Effective from 2021-01-01]. View. officer Kyiv: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2020. 42 p.
23. DSTU 2860-94:1994. Reliability of equipment. Terms and definitions. [Effective from 1996-01-01]. View. officer Kyiv: Institute of Reliability Problems of Machines and Structures, 1994. 34 p.
24. DSTU 2862-94:1994. Methods of calculating reliability indicators. [Effective from 1996-01-01]. View. officer Kyiv: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 1994. 39 p.

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-106-113

УДК 519.233.2: 621.391.83

Мельник Вікторія Вікторівна

<https://orcid.org/0000-0002-8240-1232>

Гончаренко Євген Володимирович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0001-7654-6083>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Надійність функціонування обладнання є запорукою його ефективного використання за призначенням. Нещодавній розвиток інформаційних технологій щодо обробки даних та підвищення обчислювальних можливостей сучасного обладнання знову привернули фокус уваги дослідників щодо синтезу та аналізу нових методів оцінки показників надійності. Для цивільної авіації задачі оцінки надійності особливо важливі для визначення технічного стану обладнання, оскільки його погіршення значно впливає на рівень безпеки польотів. Причини погіршення технічного стану радіоелектронного обладнання зазвичай включають старіння компонентної бази, рівень навантаження з урахуванням умов експлуатації, рівень підготовки авіаційного персоналу тощо. Тому задачі своєчасного виявлення погіршення технічного стану обладнання та оцінки параметрів, що характеризують прийняті або встановлені моделі надійності на основі результатів спостережень, є актуальними. Аналіз літератури щодо методів оцінки надійності було проведено у трьох напрямках: аналіз нормативної та регуляторної документації щодо технічної експлуатації авіаційного радіоелектронного обладнання; аналіз наукових досліджень вітчизняних вчених та аналіз світового досвіду у вирішенні проблеми оцінки надійності. При цьому аналіз показав, що більшість досліджень оцінюють такі показники надійності, як імовірність безвідмовної роботи, середній час роботи між відмовами та коефіцієнт готовності. Метою роботи є аналіз публікацій у галузі застосування передових методів розрахунку та оцінки надійності для різних технічних систем, включаючи радіоелектронне обладнання літаків та розрахунок показників надійності радіо-електронних систем, що експлуатуються під час польотів літаків Ан-74(72). Вихідною інформацією для аналізу є статистичний звіт, що містить дані про спостережувані напрацювання між відмовами. Проведене дослідження дозволило визначити сучасні тенденції у розвитку досліджень у галузі надійності та може бути також розглянутий як основа для синтезу нових методів оцінки та прогнозування надійності радіоелектронного обладнання літаків.

Ключові слова: надійність, показники надійності, радіоелектронні системи, модель відмов, прогнозування відмов, авіація.

Вступ

Бортові радіоелектронні системи є структурними частинами авіаційного обладнання, що складаються з пристроїв зв'язку, навігації та спостереження (РЕО) [1]. Ці пристрої дають можливість організувати канал зв'язку між повітряним судном та авіадиспетчерами, а також надають інформацію про місцезнаходження, повітряний рух, метеорологічну обстановку тощо [2].

Нормативні документи цивільної авіації встановлюють жорсткі вимоги до надійності РЕО через великий вплив на рівень ризиків авіаційних подій. Існують різні підходи до забезпечення надійності. Ці підходи можуть бути реалізовані на всіх етапах життєвого циклу обладнання [3].

На етапі експлуатації забезпечення надійності здебільшого пов'язане з розробкою системи підтримки рішень на основі даних для покращення процесу технічного обслуговування [4]. Така система може виконувати функції моніторингу

стану, профілактичного обслуговування, управління ресурсами та інші [5, 6].

У загальному випадку методи забезпечення високого рівня надійності можуть суттєво підвищити ефективність використання обладнання за функціональним призначенням [7].

Слід зазначити, що РЕО має певний часовий ресурс для експлуатації. Граничне значення часового ресурсу для експлуатації визначається умовами експлуатації, навантаженням, фізичними процесами, що відбуваються в компонентній базі радіоелектронних систем, діями оперативного персоналу, своєчасним виконанням технічного обслуговування та ремонту тощо. Крім того, ми можемо спостерігати випадки, коли навіть після вичерпання встановленого під час проектування часового ресурсу, рівень надійності обладнання залишається на прийнятному рівні. Зазначений фактор мотивує до розробки нових технологій оцінки та прогнозування надійності РЕО з метою визначення можливості продовження експлуатації

обладнання.

Основний внесок цього дослідження пов'язаний з удосконаленням теорії технічного обслуговування бортових радіоелектронних систем в частині синтезу нових методів прогнозування надійності. Основна увага приділяється випадку експлуатації обладнання при перевищенні меж встановленого ресурсу.

Під час експлуатації повітряних суден завдання підтримки необхідного рівня надійності РЕО є складовою частиною інженерно-авіаційного забезпечення (ІАЗ). Іншими завданнями ІАЗ є: здійснення основних процесів експлуатації авіаційної техніки, включаючи використання повітряних суден за їх функціональним призначенням; технічне обслуговування та ремонт; навчання та підготовка авіаційного персоналу; контроль та інспекцію технічного стану авіаційної техніки тощо. При цьому слід враховувати, що надійність радіоелектронних систем нерозривно пов'язана з характеристиками основних експлуатаційних процесів [8, 9].

Авіаційне обладнання, включаючи бортові пристрої РЕО, має можливість експлуатуватися до досягнення граничного стану. Своєчасне виявлення факту настання граничного стану здійснюється на основі аналізу надійності певного пристрою РЕО [10, 11].

Визначення граничного стану обладнання зазвичай пов'язане з певними показниками надійності. Виділяють такі основні показники надійності РЕО: ймовірність безвідмовної роботи, середній час напрацювання на відмову та інші [12].

Аналіз надійності може проводитися з використанням якісних та кількісних методів. Якісний аналіз проводиться до кількісного аналізу та може включати використання діагностичних дерев відмов або схем надійності, реалізацію лямбда методу та інші. Під час кількісного аналізу значення основних показників надійності розраховуються або оцінюються за заданим правилом [13, 14]. Для розрахунку показників надійності за результатами статистичних спостережень необхідно визначити модель відмов. Для опису характеру виникнення раптових відмов використовують такі розподіли: експоненціальний, DN-розподіл, DM-розподіл, логарифмічно нормальний розподіл, розподіл Вейбулла та інші.

У сучасних наукових публікаціях приділяється достатньо уваги синтезу та аналізу методів оцінки надійності.

У роботі [15] запропоновано узагальнений підхід до оцінювання показників надійності наземних радіоелектронних засобів при погіршенні їх технічного стану, що пов'язано з можливим вичерпанням встановленого ресурсу за часом. Автори зробили висновок, що з точки зору статистики, проблеми, пов'язані з погіршенням технічного стану з точки зору показників надійності, можна розділити на дві групи: виявлення факту погіршення та оцінювання тенденції зміни показників надійності після виявлення. Для виявлення факту зміни технічного стану на етапі експлуатації понад призначений термін служби в роботі пропонується використовувати методи статистичного виявлення, зокрема, засновані на критерії Неймана-Пірсона. Ці технології оцінювання можуть бути

вдосконалені шляхом застосування інших методів статистичної оцінки та інших моделей для опису процесів деградації бортових пристроїв РЕО.

У публікації [16] проведено аналіз можливих процесів деградації під час експлуатації технічних систем та оцінку їх надійності. Представивши класифікацію відмов обладнання як раптових та поступових, автори визначають процес деградації як стан, коли визначальний параметр або певний показник надійності досягає встановленого експлуатаційного порогу, після перетину якого подальша експлуатація обладнання, як правило, неможлива. При цьому визначено різні підходи до аналізу процесу зміни технічного стану, а саме: 1) підхід з використанням моделі (фізично обґрунтованої або статистичної); 2) підхід з використанням досвіду (використання експертних систем або систем з нечіткою логікою); 3) підхід з використанням даних (використання методів штучного інтелекту). Аналіз також дозволив авторам виділити два типи моделей погіршення технічного стану: 1) модель нормальної деградації (з можливістю врахування зовнішніх факторів); 2) прискорена модель. Автори надають математичний апарат для опису різних моделей та пропонують шляхи їх використання для вирішення завдань оцінювання показників надійності.

У публікації [17] здійснено аналіз нового Баєсівського методу оцінки надійності на прикладі визначення інтенсивності відмов для статистичних даних з однією відмовою та що характеризуються експоненціальною щільністю розподілу ймовірностей. Автор розглядає математичну кореляцію з урахуванням того факту, що експоненціальний розподіл можна отримати з гамма-розподілу. У роботі наведено доведення для п'яти теорем, що дають змогу зробити висновок про високу точність оцінки та водночас низьку складність обчислень. Крім того, дослідження містить числовий приклад для пояснення запропонованої методології оцінки показника надійності.

На відміну від попереднього дослідження, стаття [18] зосереджена на дослідженні непараметричного підходу до оцінки ймовірності безвідмовної роботи, який використовується для розрахунку навантаження потоків трафіку. Непараметричні методи оцінювання не вимагають від дослідника знання закону розподілу досліджуваної статистики. Такими методами є, зокрема, знакові та рангові технології. У цьому дослідженні задача вирішується на основі побудови гістограми за даними спостережень.

Стаття [19] присвячена аналізу моделі надійності Вейбулла. Для оцінки показників надійності (ймовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов та середнього напрацювання до відмови) автором розроблено схему блокового цензурування. В якості математичного апарату оцінювання обрано метод максимальної правдоподібності та Баєсівський метод.

Процеси зміни технічного стану техніки на етапі експлуатації за межами призначеного строку експлуатації розглянуто в роботі [20]. Основним математичним апаратом є теорія статистичного висновку для опису Вінерівських процесів. На цій основі автори для оцінки ймовірності безвідмовної роботи використовують модель зворотного

Гауссівського розподілу. Крім того, оцінювання значення параметрів моделі проводиться ітераційною ЕМ-процедурою, що базується на використанні функції правдоподібності. Подібний підхід використовується в публікації [21]; однак, основна увага приділяється аналізу наборів даних з невеликим розміром спостереження.

Сучасним трендом в області обробки сигналів та даних, теорії прийняття рішень на основі даних є застосування технологій на основі штучного інтелекту. Ця тенденція не оминула і теорію надійності. Наприклад, у роботі [22] розглянуто особливості застосування нейронної мережі зворотного поширення помилки для вирішення завдань оцінки надійності. Ця нейронна мережа складається з вхідного, прихованого та вихідного шарів. Навчання нейронної мережі проводиться в програмі Matlab з урахуванням припущення про дво-параметричний розподіл Вейбулла для напрацювання до відмови. Після застосування методу медіанних рангів автори отримали точні оцінки ймовірності безвідмовної роботи та середнього часу напрацювання на відмову для досліджуваних наборів даних. Інший тип нейронної мережі для прогнозування надійності був досліджений у [23]. Така мережа є комплексно-значною нейронною мережею, що дозволяє якісно вирішувати задачі середньострокового та довгострокового прогнозування, тому її застосування для визначення технічного стану обладнання є виправданим.

Проведений аналіз наукових досліджень у галузі розробки та застосування методів оцінки надійності показав, що сучасні інформаційні технології здатні реалізовувати складні математичні розрахунки, завдяки чому можна отримати кращу ефективність оцінки та кращі прогностичні властивості. Серед перспективних методів оцінки надійності залишаються: Баєсівські процедури, метод максимальної правдоподібності та методи, що базуються на використанні нейронних мереж.

Метою даного дослідження є аналіз надійності радіоелектронних систем, що експлуатуються під час польотів літаків Ан, з використанням існуючої методології та синтез нових методик оцінки надійності у випадку експлуатації техніки після встановленого під час проектування ресурсу.

Матеріали та методи

В роботі проводиться аналіз надійності радіоелектронних систем літаків, що експлуатуються в Україні. Об'єктом розгляду є парк із п'яти літаків Ан.

Отримано статистичні звіти щодо надійності роботи РЕО повітряних суден протягом 2018-2022 років для зазначеного парку повітряних суден.

Аналіз показав, що основним джерелом відмов є два типи обладнання:

- обладнання радіолокації;
- радіонавігаційне обладнання;

Статистичні звіти з моніторингу надійності включають:

- реєстрацію дня відмови;
- тривалість роботи обладнання з початку експлуатації (ЗПЕ);
- тривалість роботи обладнання після останнього ремонту (ПОР);
- тривалість роботи обладнання після останніх регламентних робіт (ПОРР);
- причина відмови та її наслідки;
- особливості відмови та коригувальні заходи, спрямовані на запобігання спостережуваній відмові.

Приклад статистичних даних щодо напрацювань між відмовами обладнання наведено в таблиці 1, де на момент виявлення відмови зафіксовані наступні часові показники:

ЗПЕ – час напрацювання з початку експлуатації;

ПОР – час напрацювання після останнього ремонту;

ПОРР – час напрацювання після останніх регламентних робіт.

Таблиця 1

Статистичні дані щодо напрацювань між відмовами

Номер відмови	Обладнання	Напрацювання (години)		
		ЗПЕ	ПОР	ПОРР
1	“Буран-72”	211	64	46
2	“Буран-72”	219	73	52
3	“Буран-72”	2507	39	39
4	“Буран-72”	230	102	62
5	“Курс МП-70”	1340	563	8
6	“Буран-72”	240	10	173
7	“Курс МП-70”	2579	369	123
8	“Буран-72”	251	11	184
9	“Буран-72”	251	30	184
10	“Буран-74”	2591	88	7
11	“Курс МП-70”	1389	205	6
12	“Курс МП-70”	909	112	181
13	“Буран-74”	2600	9	16
14	“Буран-72”	918	918	190
15	“Буран-74”	2605	101	21
16	“Буран-74”	2638	54	54
17	“Курс МП-70”	946	37	218
18	“Буран-72”	953	170	225
19	“Буран-72”	358	358	191
20	“Курс МП-70”	2710	135	13
21	“Буран-72”	1057	140	93

Результати

За результатами аналізу статистичних звітів визначено, що протягом використання зазначеного парку повітряних суден за призначенням за 2018 – 2022 роки трапилося 21 відмова комплексу “Буран-72 (74)” та системи “Курс МП-70”. При цьому 15 відмов стосувалися радіолокаційного комплексу “Буран-72 (74)”. Окрім того, слід зазначити, що відмова бортової радіолокаційної станції значно підвищує ризики виникнення авіаційних подій, наслідки яких можуть бути катастрофічними.

Причинами відмов були:

низька надійність деяких блоків обладнання;
довготривала експлуатація обладнання (у тому числі поза межами встановленого терміну служби).

Відмови проявлялися у відсутності або некоректності індикації, несправному стані передавача, несправному стані резервного комплекту, у вигляді перегорання запобіжників, відсутності управління обладнанням, проблемами з обертання антенних систем тощо.

Для візуального та більш детального аналізу наведених статистичних даних побудуємо відповідні графіки. При цьому зробимо такі позначення: напрацювання з початку експлуатації ЗПЕ – $t_{ЗПЕ}$, напрацювання після останнього ремонту ПОР – $t_{ПОР}$, напрацювання ПОРР – $t_{ПОРР}$, кумулятивна функція розподілу – $F(t_{ПОР})$.

Графіки залежності напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОР, напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОРР та напрацювання ПОР від напрацювання ПОРР наведені на рис. 1 – 3.

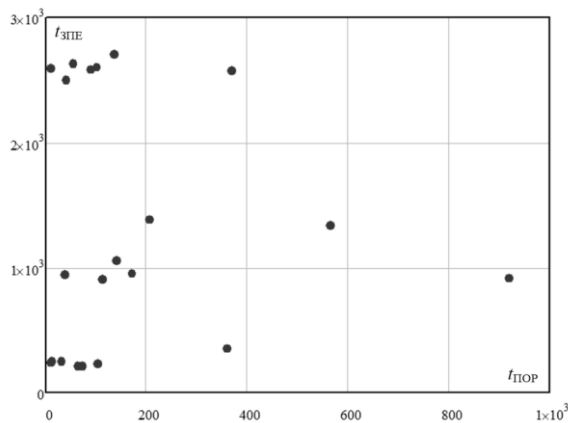


Рисунок 1. Графік залежності напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОР

За точковими даними на рис. 1 та 2 можна відстежити загальну кількість експлуатованих засобів радіолокації та радіонавігації, під час експлуатації яких виникали раптові відмови. На цих графіках залежності можна відстежити 11 зростаючих груп кластерів, які відповідають 11 зразкам експлуатованого РЕО.

Дані на рис. 3 є більш важливими з точки зору вдосконалення процесів експлуатації РЕО ПС. На рис. 3 проведена додаткова пряма $y(t) = t$, яка необхідна для співвідношення ремонтних та регламентних робіт. Як видно, 9 точкових

спостережень розміщені нижче прямої лінії. Така ситуація відповідає випадку, коли $t_{ПОР} < t_{ПОРР}$. Фізично це означає, у випадку відсутності проведення регламентних робіт після відмови 42,9 % зразків РЕО знов відмовить протягом наступних 200 годин експлуатації. Точки, що знаходяться над прямою лінією, умовно розділити на два кластери: 1) кучний кластер біля початку системи координат та 2) кластер широкого радіусу, що містить 4 точки зі значеннями напрацювань $t_{ПОР} > 350$ годин.

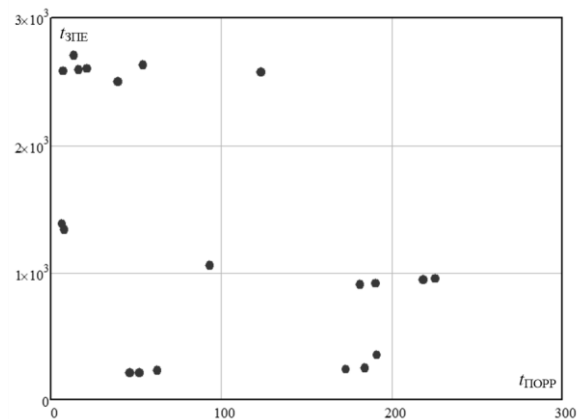


Рисунок 2. Графік залежності напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОРР

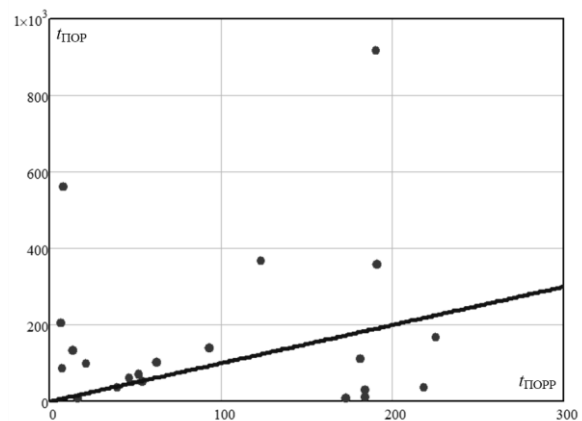


Рисунок 3. Графік залежності напрацювання ПОР від напрацювання ПОРР

Перший кластер свідчить про неефективність виконання планових регламентних робіт після відновлення працездатності РЕО. Другий кластер відповідає випадку ефективного технічного обслуговування. Однак за результатами наведених статистичних спостережень планові регламентні роботи були виконані ефективно лише у 33 % спостережень. Наведений результат спонукає до модернізації як змісту планових регламентних робіт, так і їхньої тривалості.

Для дослідження статистичної природи спостережених даних побудуємо кумулятивну функцію розподілу напрацювань ПОР. Побудова цієї функції здійснювалася у три етапи:

ранжування спостережених напрацювань ПОР у порядку зростання від найменшого до найбільшого;

визначення значень кумулятивної функції

розподілу з наступних міркувань. Ця функція є східчастою кривою, значення якої дорівнює ймовірності того, що $t_{\text{ПОР}}$ буде меншою за наперед заданого значення. Оскільки обсяг спостережень дорівнює 21, то кумулятивна функція розподілу буде містити 21 сходинку з амплітудою $1/21$, кожна з яких спостерігається в момент виникнення відмови;

побудова кумулятивної функції розподілу за формулою 1:

$$F(t_{\text{ПОР}}) = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{21} \varphi(t - t_{\text{ПОР}i}), \quad (1)$$

де $\varphi(t - t_{\text{ПОР}i})$ – функція Хевісайда, яка дорівнює нулю, якщо $t < t_{\text{ПОР}i}$, та одиниці – у протилежному випадку.

Слід зазначити, що відповідно основних теоретичних постулатів теорії надійності у зазначеному випадку кумулятивна функція розподілу буде співпадати з ймовірністю відмови РЕО $Q(t)$. За її значеннями можна знайти ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, а також щільність розподілу ймовірностей напрацювань між відмовами $f(t)$. При цьому слід зазначити, що для розрахунку щільності розподілу ймовірностей необхідно виконати графічно дискретне визначення похідної. За результатами спостережень також було визначено середнє напрацювання між відмовами, яке склало 171 годину.

Перевіримо гіпотезу щодо експоненціального закону розподілу спостережених статистичних даних про напрацювання між відмовами. При цьому теоретична кумулятивна функція розподілу визначатиметься відповідно до формули 2:

$$F^{(\text{ТЕОР})}(t_{\text{ПОР}}) = 1 - e^{-t_{\text{ПОР}}/21}, \quad (2)$$

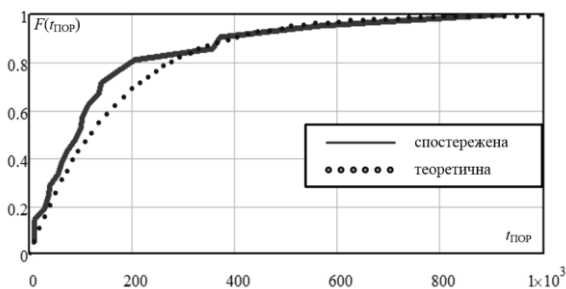


Рисунок 4. Теоретична та спостережена кумулятивні функції розподілу

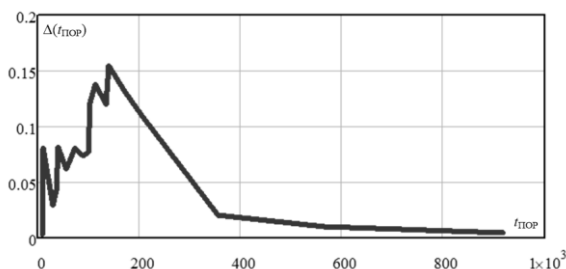


Рисунок 5. Відхилення між теоретичною та спостереженою кумулятивними функціями розподілу напрацювань ПОР

На рисунках 4 та 5 наведені результати порівняння теоретичної та спостереженої кумулятивних функцій розподілу.

На рис. 5 параметр $\Delta t_{\text{ПОР}}$ є різницею за модулем між теоретичною та спостереженою кумулятивними функціями розподілу напрацювань ПОР.

Для перевірки узгодженості між функціями розподілу було використано модифікований критерій Колмогорова для малих вибірок. Це пояснюється тим, що звичайний класичний критерій Колмогорова слід застосовувати у випадку, коли обсяг спостережень перевищує 50 значень. Критичне значення модифікованого критерію склало 0,747. А отже, можна зробити висновок, що з довірчою ймовірністю 0,64 спостережені значення напрацювань ПОР РЕО повітряних суден можуть бути описані експоненціальним законом розподілу.

Обговорення

Для більш глибокого з'ясування причин виникнення відмов РЕО ПС був проведений аналіз інших експлуатаційних звітів. Унаслідок такого аналізу, а також враховуючи теоретичні засади з особливостей експлуатації бортового РЕО, можна виділити такі причини виникнення відмов:

- старіння компонентної бази радіоелектронного обладнання;
- електромагнітна сумісність та електромагнітні впливи;
- несправність складових систем та допоміжних елементів;
- неефективне технічне обслуговування та ремонт;
- недостатня кваліфікація персоналу;
- обмеженість витратного фонду авіапідприємства та відсутність якісних запасних частин;
- неефективний контроль якості під час виробництва;
- складні умови експлуатації;
- порушення умов зберігання та транспортування;
- наявність прихованих невідповідностей у системах експлуатації РЕО.

Основною причиною збільшення кількості відмов є процес погіршення технічного стану РЕО. Зазвичай такий процес пов'язаний з аналізом параметра інтенсивності відмов та можливостями виникнення раптових відмов. Для цього випадку в випадковий момент часу інтенсивність відмов починає зростати. Практика експлуатації показує, що цей момент часу зазвичай знаходиться поблизу граничних значень призначеного ресурсу обладнання, визначеного на етапі проектування. Визначення моменту початку деградаційних процесів є актуальним завданням, оскільки до його виникнення обладнання зберігає свої основні функції і ще можлива його ефективна робота.

Для прийняття рішення про деградацію РЕО необхідно розробити процедури обробки даних про надійність. Зазвичай такі процедури передбачають складні математичні розрахунки,

але сучасний розвиток інформаційних технологій дозволяє досить швидко реалізувати ці розрахунки. Наприклад, якщо параметр інтенсивності відмов $\lambda(t)$ зростає відповідно до квадратичної функції, найпростішим математичним описом параметрів надійності (ймовірності безвідмовної роботи та функції щільності ймовірності для часу роботи між відмовами) буде

$$\lambda(t) = \lambda_0 \vartheta(t) + \omega(t - t_{\text{дег}})^2 \vartheta(t - t_{\text{дег}}),$$

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t - \frac{1}{3} \omega (t - t_{\text{дег}})^3 \vartheta(t - t_{\text{дег}})},$$

$$f(t) = (\lambda_0 \vartheta(t) + \omega(t - t_{\text{дег}})^2 \vartheta(t - t_{\text{дег}})) e^{-\lambda_0 t - \frac{1}{3} \omega (t - t_{\text{дег}})^3 \vartheta(t - t_{\text{дег}})},$$

де λ_0 – інтенсивність відмови для нормальних умов експлуатації; ω – швидкість деградації; $t_{\text{дег}}$ – момент часу початку деградаційних процесів; $\vartheta(x)$ – одинична функція, яка може приймати значення:

$$\vartheta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

У практиці експлуатації обладнання також спостерігаються випадки деградації, які пов'язані з поступовими відмовами. Така ситуація викликає необхідність вимірювання певних визначальних параметрів. При цьому процедура обробки даних вимагає побудови достатньо точних математичних моделей, наведених в роботі [24].

Для вдосконалення процедури превентивного обслуговування необхідна апіорна інформація про експлуатаційні допуски, а відповідне технічне обслуговування повинно проводитися в момент, коли визначальний параметр безпосередньо наближається до допуску. Такий підхід дозволяє збільшити тривалість використання обладнання за його функціональним призначенням і зменшити спостережувану кількість відмов.

Висновки

Стаття присвячена питанням аналізу надійності РЕО повітряних суден. Об'єктом дослідження став парк із п'яти літаків Ан-74(72), що експлуатуються в Україні.

У статті проаналізовано реальні статистичні дані напрацювання на відмову навігаційного та радіолокаційного обладнання. На підставі цих даних були отримані залежності напрацювання з початку експлуатації (ЗПЕ) від напрацювання після останнього ремонту (ПОР), напрацювання з початку експлуатації (ЗПЕ) від напрацювання після останніх регламентних робіт (ПОРР) та напрацювання після останнього ремонту (ПОР) від напрацювання після останніх регламентних робіт (ПОРР). Ці залежності дають можливість прийняти рішення щодо ефективності здійснення експлуатаційних процесів. Крім того, виконано розрахунок кумулятивної функції розподілу напрацювань ПОР, яку можна використовувати для визначення ймовірності безвідмовної роботи та щільності розподілу ймовірності для напрацювання ПОР. Запропонований експоненційний закон розподілу характеризується сталою інтенсивністю відмов. Такий розподіл не враховує старіння та зношування. Разом з тим запропонований розподіл надає суттєві методичні похибки під час оцінювання показників надійності.

Рекомендую врахувати під час подальшого проведення досліджень процесів старіння елементів та блоків авіаційної техніки.

Майбутні напрямки досліджень пов'язані з: обґрунтуванням статистичної моделі раптових відмов бортових радіоелектронних систем; аналізом процедур прогнозування для оцінки показників надійності;

впровадженням методів, заснованих на даних, для прогнозного технічного обслуговування бортових радіоелектронних систем;

удосконаленням процесу технічного обслуговування у разі погіршення стану обладнання.

Список використаних джерел

1. Ostroumov, I.V., Marais, K., Kuzmenko, N.S.: Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. *Aviation* 26(1), 1–10 (2022). DOI: 10.3846/aviation.2022.16589.
2. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Configuration analysis of European navigational aids network. In: *International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference*, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2021). DOI: 10.1109/ICNS52807.2021.9441576.
3. Solomentsev, O. et al.: Data processing through the lifecycle of aviation radio equipment. In: *IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, pp. 146–151. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000844.
4. Zaliskyi, M. et al.: Model building for diagnostic variables during aviation equipment maintenance. In: *IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, pp. 160–164. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000556.
5. Jardine, A.K.S., Tsang, A.H.C.: *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (2017).
6. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Statistical analysis and flight route extraction from automatic dependent surveillance-broadcast data. In: *International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference*, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2022). DOI: 10.1109/ICNS54818.2022.9771515.
7. Galar, D., Sandbom, P., Kumar, U.: *Maintenance costs and life cycle cost analysis*. CRC Press, Boca Raton (2017).
8. Sushchenko, O. et al.: Airborne sensor for measuring components of terrestrial magnetic field. In: *41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 687–691. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926760.
9. Ostroumov, I. et al.: Relative navigation for vehicle formation movement. In: *3rd KhPI Week on Advanced Technology*, pp. 1–4. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916414.
10. Kuzmenko, N. et al.: Airplane flight phase identification using maximum posterior probability method. In: *3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing*, pp. 1–5. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/SAIC57818.2022.9922913.
11. Larin, V. et al.: Prediction of the final discharge of the UAV battery based on fuzzy logic estimation of information and influencing parameters. In: *3rd KhPI Week on Advanced Technology*, pp. 1–6. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916490.
12. Averyanova, Yu. et al.: Turbulence detection and classification algorithm using data from AWR. In: *IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, pp. 518–522. IEEE, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037172.
13. Solomentsev, O.V., Zaliskyi, M.Yu., Zuiiev O.V., Asanov, M.M.: Data processing in exploitation system of Unmanned Aerial Vehicles radioelectronic equipment. In: *2nd International*

Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, pp. 77–80. IEEE, Kyiv, Ukraine (2013).

14. Sushchenko, O. et al.: Integration of MEMS inertial and magnetic field sensors for tracking power lines. In: XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), pp. 33–36. IEEE, Polyana (Zakarpattia), Ukraine (2022). DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002907.

15. Solomentsev, O., Zaliskyi, M., Herasymenko, T., Kozhokhina, O., Petrova, Y.: Data processing in case of radio equipment reliability parameters monitoring. In: 2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), pp. 219–222. IEEE, Riga, Latvia (2018). DOI: 10.1109/RTUWO.2018.8587882.

16. Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P., Sun, Y.: A review on degradation models in reliability analysis. In: Kiritsis, D., Emmanouilidis, C., Koronios, A., Mathew, J. (eds.): Engineering Asset Lifecycle Management, pp. 369–384. Springer, London (2010). DOI: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.

17. Han, M.: Estimation of failure rate and its applications in reliability engineering. In: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, pp. 924–928. IEEE, Chengdu, China (2012). DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2012.6246376.

18. Hu, Y., Wei, G., Ke, Y.: Application of reliability non-parametric estimation methods based on computation of capacity. In: 9th International Conference on Reliability, Maintainability and

Safety, pp. 445–449. IEEE, Guiyang, China (2011). DOI: 10.1109/ICRMS.2011.5979311.

19. Zhu, T.: Reliability estimation for two-parameter Weibull distribution under block censoring. Reliability Engineering and System Safety 203, 1–27 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.107071.

20. Pan, D., Wei, Y., Fang, H., Yang, W.: A reliability estimation approach via Wiener degradation model with measurement errors. Applied Mathematics and Computation 320, 131–141 (2018). DOI: 10.1016/j.amc.2017.09.020.

21. Liu, D., Wang, S.: A degradation modeling and reliability estimation method based on Wiener process and evidential variable. Reliability Engineering and System Safety 202, 1–28 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.106957.

22. Su, C., Jiang, Y.: Forecasting model for degradation path and parameter estimation based on neural network. In: 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1735–1738. IEEE, Beijing, China (2009). DOI: 10.1109/ICIEEM.2009.5344341.

23. Fink, O., Zio, E., Weidmann, U.: Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks. Reliability Engineering and System Safety, 121, 198–206 (2014). DOI: 10.1016/j.res.2013.08.004.

24. Al-Azzeh, J., Mesleh, A., Zaliskyi, M., Odarchenko, R., Kuzmin, V.: A method of accuracy increment using segmented regression. Algorithms 15(10): 378, 1–24 (2022). DOI: 10.3390/a15100378.

Viktoriiia Melnyk

<https://orcid.org/0000-0002-8240-1232>

Yevhen Honcharenko (PhD)

<https://orcid.org/0000-0001-7654-6083>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE RELIABILITY ASSESSMENT METHODS FOR ONBOARD RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

Reliability of equipment functioning is a guarantee of its effective intended use. Recently, researchers again began to pay attention to the synthesis and analysis of new reliability assessment methods, which is primarily related to the development of information technologies for data processing and computing capabilities of modern equipment. In civil aviation, reliability assessment tasks are particularly important for determining the technical condition of equipment, as its deterioration has a significant impact on the level of flight safety. The reasons for the deterioration of the technical condition of radio electronic equipment are usually the aging of the component base, the level of load considering operating conditions, the level of training of aviation personnel, etc. Therefore, the tasks of timely detection of the equipment technical condition deterioration and estimation of the parameters characterizing the adopted or established reliability models based on the results of observations are relevant. The literature analysis of reliability assessment methods was carried out in three directions: analysis of normative and regulatory documentation on the technical operation of aviation radio electronic equipment; analysis of scientific research by domestic scientists and analysis of world experience in solving the problem of reliability assessment. At the same time, the analysis showed that most studies evaluate such reliability indicators as the probability of failure-free operation, the mean operating time between failures, and the availability factor. The purpose of this work is to analyze publications in the field of application of advanced methods for calculating and assessing the reliability of various technical systems, including the reliability calculation of radio-electronic systems used during the flights of An-74(72) aircrafts. The source information for the analysis is a statistical report containing data on observed mean times between failures. The analysis conducted in the article allowed to identify current trends in the development of research in the field of reliability and can also be considered as a basis for the synthesis of new methods for evaluating and predicting the reliability of aircraft radio-electronic equipment.

Keywords: *reliability, reliability indicators, radio-electronic systems, failure model, failure prediction, aviation.*

References

1. Ostroumov, I.V., Marais, K., Kuzmenko, N.S.: Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. Aviation 26(1), 1–10 (2022). DOI: 10.3846/aviation.2022.16589.

2. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Configuration analysis of European navigational aids network. In: International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance

Conference, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2021). DOI: 10.1109/ICNSS52807.2021.9441576.

3. Solomentsev, O. et al.: Data processing through the lifecycle of aviation radio equipment. In: IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), pp. 146–151. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000844.

4. Zaliskyi, M. et al.: Model building for diagnostic variables

- during aviation equipment maintenance. In: IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), pp. 160–164. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000556.
5. Jardine, A.K.S., Tsang, A.H.C.: Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (2017).
6. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Statistical analysis and flight route extraction from automatic dependent surveillance-broadcast data. In: International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2022). DOI: 10.1109/ICNS54818.2022.9771515.
7. Galar, D., Sandborn, P., Kumar, U.: Maintenance costs and life cycle cost analysis. CRC Press, Boca Raton (2017).
8. Sushchenko, O. et al.: Airborne sensor for measuring components of terrestrial magnetic field. In: 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 687–691. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926760.
9. Ostroumov, I. et al.: Relative navigation for vehicle formation movement. In: 3rd KhPI Week on Advanced Technology, pp. 1–4. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916414.
10. Kuzmenko, N. et al.: Airplane flight phase identification using maximum posterior probability method. In: 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing, pp. 1–5. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/SAIC57818.2022.9922913.
11. Larin, V. et al.: Prediction of the final discharge of the UAV battery based on fuzzy logic estimation of information and influencing parameters. In: 3rd KhPI Week on Advanced Technology, pp. 1–6. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916490.
12. Averyanova, Yu. et al.: Turbulence detection and classification algorithm using data from AWR. In: IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), pp. 518–522. IEEE, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037172.
13. Solomentsev, O.V., Zaliskyi, M.Yu., Zuiiev O.V., Asanov, M.M.: Data processing in exploitation system of Unmanned Aerial Vehicles radioelectronic equipment. In: 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, pp. 77–80. IEEE, Kyiv, Ukraine (2013).
14. Sushchenko, O. et al.: Integration of MEMS inertial and magnetic field sensors for tracking power lines. In: XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), pp. 33–36. IEEE, Polyana (Zakarpattia), Ukraine (2022). DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002907.
15. Solomentsev, O., Zaliskyi, M., Herasymenko, T., Kozhokhina, O., Petrova, Y.: Data processing in case of radio equipment reliability parameters monitoring. In: 2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), pp. 219–222. IEEE, Riga, Latvia (2018). DOI: 10.1109/RTUWO.2018.8587882.
16. Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P., Sun, Y.: A review on degradation models in reliability analysis. In: Kiritsis, D., Emmanouilidis, C., Koronios, A., Mathew, J. (eds.): Engineering Asset Lifecycle Management, pp. 369–384. Springer, London (2010). DOI: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.
17. Han, M.: Estimation of failure rate and its applications in reliability engineering. In: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, pp. 924–928. IEEE, Chengdu, China (2012). DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2012.6246376.
18. Hu, Y., Wei, G., Ke, Y.: Application of reliability non-parametric estimation methods based on computation of capacity. In: 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, pp. 445–449. IEEE, Guiyang, China (2011). DOI: 10.1109/ICRMS.2011.5979311.
19. Zhu, T.: Reliability estimation for two-parameter Weibull distribution under block censoring. Reliability Engineering and System Safety 203, 1–27 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.107071.
20. Pan, D., Wei, Y., Fang, H., Yang, W.: A reliability estimation approach via Wiener degradation model with measurement errors. Applied Mathematics and Computation 320, 131–141 (2018). DOI: 10.1016/j.amc.2017.09.020.
21. Liu, D., Wang, S.: A degradation modeling and reliability estimation method based on Wiener process and evidential variable. Reliability Engineering and System Safety 202, 1–28 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.106957.
22. Su, C., Jiang, Y.: Forecasting model for degradation path and parameter estimation based on neural network. In: 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1735–1738. IEEE, Beijing, China (2009). DOI: 10.1109/ICIEEM.2009.5344341.
23. Fink, O., Zio, E., Weidmann, U.: Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks. Reliability Engineering and System Safety, 121, 198–206 (2014). DOI: 10.1016/j.res.2013.08.004.
24. Al-Azzeh, J., Mesleh, A., Zaliskyi, M., Odarchenko, R., Kuzmin, V.: A method of accuracy increment using segmented regression. Algorithms 15(10): 378, 1–24 (2022). DOI: 10.3390/a15100378.

Шановні колеги!

Запрошуємо до участі у науково-практичному журналі
“Повітряна міць України”,

Видавець: Національний університет оборони України,
відкрите видання.

На сторінках журналу розглядаються такі питання:

1. Питання розвитку, застосування та забезпечення Повітряних Сил Збройних Сил України, удосконалення їх системи управління.
2. Питання бойового застосування військових частин та підрозділів державної авіації України, зенітних ракетних військ, радіотехнічних та спеціальних військ, радіотехнічного забезпечення та зв'язку.
3. Моделювання процесів застосування родів військ та спеціальних військ Повітряних Сил Збройних Сил України.
4. Питання розвитку перспективних засобів повітряного нападу.
5. Дослідження процесів управління та застосування пілотованої та безпілотної авіації.
6. Теоретичні основи взаємодії під час застосування військових частин та підрозділів Повітряних Сил, Сухопутних військ, Військово-Морських Сил, Десантно-штурмових військ Збройних Сил України та інших військових формувань.
7. Питання розвитку логістичного забезпечення родів військ Повітряних Сил Збройних Сил України.
8. Безпека застосування та забезпечення живучості сил та засобів родів військ та спеціальних військ Повітряних Сил Збройних Сил України.
9. Питання запобігання надзвичайним ситуаціям терористичного та техногенного характеру, що пов'язані з діяльністю військових частин (підрозділів) Повітряних Сил Збройних Сил України.
10. Досвід щодо проведення операцій (антитерористичних, миротворчих, Сил оборони).
11. Інноваційні процеси у галузях авіації, автомобілебудування, радіоелектроніки, радіотехніки, засобів зв'язку та АСУ, а також інформаційних технологій.

Подання матеріалів

Обсяг рукопису – від 4 до 10 аркушів українською або англійською мовами.

Для публікації необхідно надіслати статтю у електронній формі (**docx** та **pdf** – копія оригіналу з відомостями щодо відсутності інформації з обмеженим доступом та підписаними всіма авторами статті кожного аркуша).

Рукопис супроводжується експертним висновком, рецензією кандидата наук (доктора філософії, доцента), витягом з протоколу засідання кафедри (відділу).

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.

З питань оплати звертатись до редакції.

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.

¹Полуботок Павло Леонтійович (д-р техн. наук, професор) ← (кегль – 11 та 8 пт.)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X> ← (кегль – 10 пт.)

²Острозький Костянтин Іванович (канд. техн. наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

← 1 пустий рядок – 6 пт.

¹Університет..., Київ, Україна

← (кегль – 11 пт.)

²Інститут..., Київ, Україна

← 1 пустий рядок – 10 пт.

НАЗВА СТАТТІ (*Times New Roman*, кегль – 14 пт.; накреслення – “напівжирне”, по центру)

← 1 пустий рядок – 10 пт.

Текст анотації мовою тексту статті (в даному випадку – українською). Зміст анотації має стисло і достатньо інформативно підсумовувати основні ідеї та отримані результати дослідження. Вона має бути відповідно структурована (актуальність, мета, методи, результати, рекомендації для кого ця стаття буде корисною). Розмір анотації повинен становити не менше 600-800 друкованих символів з пробілами. Зверніть увагу на те, що дані про авторів, назва, ключові слова та анотація будуть використані як метадані для опису Вашої статті, тому вони повинні максимально чітко описувати її зміст. Для більш якісного пошуку даного контенту в мережі, будь ласка, уникайте занадто узагальнених та складних формулювань, використовуйте тільки загальновідомі аббревіатури.

Ключові слова: поняття1; поняття2; поняття3. (кегль – 10 пт.)

Структура рукопису

Роботу структурувати згідно з IMRAD – стандарт оформлення наукової статті.

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

Introduction – вступ

Висвітлено цінність дослідження для

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 (кегль – 9 пт). Рекомендовано вписувати не менше 20 посилань, і декілька з них на роботи, які були опубліковані в останні роки.

Приклади оформлення списку використаних джерел згідно з IEEE style:

Книга

[1] Б. Г. Паначевний та Ю. Ф. Свергун, Загальна електротехніка: Теорія і практикум. Київ, Україна: Каравела, 2003.

Частина книги (розділ тощо)

[2] Л. В. Строкова, “Мармурова ступка V–VI ст. з Керчі”, у Український музей, М. І. Гладких, Ред. Київ, Україна: Т-во археології та антропології, 2003, с. 114–116.

Стаття (публікація) в періодичному виданні

Стаття в журналі

[3] О. А. Жученко та М. Г. Волощук, “Дослідження температурних полів процесу графітування вуглецевих виробів”, Автоматизація технологічних і бізнес-процесів, т. 10, № 3, с. 25–35, листоп. 2018, doi:

10.15673/atbp.v10i3.1087. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://journals.onaft.edu.ua/index.php/atbp/article/view/1087/1183>.

Стаття в газеті

[4] В. Андрущенко, “У Карпатах зводять сучасний навчально-виробничий комплекс столичного університету імені Драгоманова”, Голос України, № 87, с. 11, 11 трав. 2019.

Сайт

[5] Б. Мірошніченко та Д. Денков. “Чи відмовиться Україна нарешті від небезпечного азбесту?” Економічна правда. <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/12/6/680401/> (дата звернення 7 груд. 2021).

Відео (онлайн)

[6] ППЧ. Екскурсія на металургійне виробництво Побузького феронікелевого комбінату. (5 груд. 2020). Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн-відео]. Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=mHxVjGKG7k>

Допис у соціальній мережі

[7] E. Musk [@elonmusk], SpaceX is starting a program to take CO2 out of atmosphere & turn it into rocket fuel. Please join if, Twitter, Dec. 13, 2021. Accessed: Dec. 15, 2021. [Online]. Available: <https://twitter.com/elonmusk/status/1470519292651352070>.

Дисертація

[8] А. М. Любека, “Гранулювання багатокомпонентних рідких систем в 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 конференцій

Тези доповіді

[10] А. Ясентюк, “Статистичний аналіз фінансування вищої освіти в Україні”, у Обліково-аналітичні й статистичні методи та моделі в оподаткуванні, бізнесі, економіці, Ірпінь, Україна, 26 листоп.–3 груд. 2018. Ірпінь, Україна: Університет державної фіскальної служби України, 2019, с. 227–229. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: http://ir.nusta.edu.ua/jspui/bitstream/doc/3296/1/3516_IR.pdf

Закон, нормативний акт

[11] Україна, Кабінет Міністрів України. (2015, 27 трав.). Постанова Кабінету Міністрів України № 330, Про визначення наукових метрологічних центрів. Дата звернення: 7 груд.

2021. [Онлайн]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/330-2015-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/docum ent?id=245416376>.

Препринт

[13] M. S. Bashir and M.-S. Alouini, Energy optimization of a laser-powered hovering-uavrelay in optical wireless backhaul. To be published. Accessed: Dec. 7, 2021. [Online]. Available: https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Energy_Optimization_of_a_Laser-Powered_Hovering-UAV_Relay_in_Optical_Wireless_Backhaul/17087309

Патент

[14] Двоважільна підвіска легких броньованих машин, винахідники Б. О. Мельник та В. О. Дачковський. (11 листоп. 2013). Патент України UA84874U. Дата звернення: 7 груд. 2021. [Онлайн]. Доступно: <https://uapatents.com/4-84874-dvovazhilna-pidviska-legkikh-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-sylysluzhbvym-spravam-osvity-dlya-zabezpechennya-protsvitannya-molodoyiukrayinskoyi-derzhavy-z-nagody-150-richchya-vid-dnya-narodzhenniamykoly-prokopovycha-vasylenka-1866-1935/#GmediaGallery_101-3810.

Текст статті розбивається на відповідні розділи з підзаголовками, які виділені напівжирним шрифтом.

На останньому аркуші статті після списку літератури наводяться: назва статті, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь та вчене звання автора (співавторів), назва організації, у якій працює автор (співавтори), анотація та ключові слова українською, англійською мовами (крім основної мови статті) за нижченаведеним зразком (11 кегль (8 для наукового ступеня, звання, посади), міжрядковий інтервал – 1,0, вирівнювання – по центру).

де r – радіус кола

← 1 пустий рядок – 6 пт.

Для заміни стандартного для рівнянь шрифту *Cambria Math* необхідно виділити формулу, у вкладці *Робота з рівняннями* активувати кнопку *Звичайний текст* після цього у вкладці *Головна* обрати шрифт *Times New Roman*.

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 10 пт.

Рисунки **обов’язково** супроводжуються центрованими підписаними підписами (кегель – 10).

Не допускаються кольорові та фонові рисунки.

Допускається розташування великих рисунків, формул та таблиць в одну колонку (до 16 см.).

Структура рукопису

Роботу структурувати згідно з IMRAD – стандарт оформлення наукової статті.

Introduction – вступ (висвітлено цінність дослідження для наукової спільноти, висвітлено виконану роботу та вказано про подальшу необхідність даного дослідження, сформульовано основні тези та висвітлено матеріали попередніх досліджень з даної області, визначено головні завдання та гіпотези);

Materials and methods – матеріали та методи (висвітлено матеріали та методи за допомогою яких проводилося дослідження);

Results – результати (висвітлено основні положення і результати наукового дослідження, особисті ідеї, думки, отримані наукові факти, виявлені закономірності, зв’язки, тенденції, методика отримання та аналіз фактичного матеріалу, особистий внесок автора у досягнення і реалізацію висновків);

Discussion – обговорення (науковець дає оцінку результатів та пояснює як ці результати були отримані, аналізує їх та робить висновки та дає необхідні рекомендації для вивчення даної теми в подальших дослідженнях, захищає отримані дані, проводить

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

Ланки: використовуйте тільки англійську розкладку

Не використовуйте для форматування тексту пропуски, табуляцію тощо. Не встановлюйте ручне перенесення слів, не використовуйте колонотули. 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.

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.

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 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.

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 (співавтор), 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). Обсяг анотації – не менше 250 слів.

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, наприклад – “безпілотний літальний апарат (БпЛА)”.

Лапки: використовуйте тільки англійську розкладку.

Не використовуйте для форматування тексту пропуски, табуляцію тощо. Не встановлюйте ручне перенесення слів, не використовуйте колонититули. Між значенням величини та одиницею її вимірювання ставте нерозривний пропуск (Ctrl + Shift + пропуск).

УВАГА! Остання сторінка статті заповнюється не менше 3/4, рекомендована парна кількість аркушів.

Кількість авторів – не більше трьох.

Вимоги до мови

Будь ласка, переконайтеся, що ваша стаття була ретельно вичитана та відповідає вимогам щодо ясності мови та стилістичної правильності.

Набір формул: за допомогою стандартного редактора рівнянь Microsoft Word: *Вставка* → *Символи* → *Рівняння*.

Формули та опис до них рекомендовано вставляти у таблиці (границі таблиць виставляти невидимими, формулу вирівнювати по центру, номер формули в круглих дужках, вирівнювання по правому краю, вирівнювання в ячейках по центру). Наприклад:

← 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 надрядковий індекс 8 пт.

При посиланні на формулу (рівняння) використовувати “формула.” Перед номером рівняння (наприклад: “Усі величини у формулі (1) є ...”)

Стиль формул – “прямий” для символів *Кирилицею* та “курсив” для *Латинських* символів.

Табличний заголовок (напівжирний, 10 пт.) – **обов'язковий**, в таблиці 10 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.).

¹**Pavlo Polubotok** (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

²**Kostyantyn Ostrogski** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

¹*University..., Kyiv, Ukraine*

²*Institute..., Kyiv, Ukraine*

ARTICLE TITLE

¹**Pavlo Polubotok** (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

²**Kostyantyn Ostrogski** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

¹*University..., Kyiv, Ukraine*

²*Institute..., Kyiv, Ukraine*

Translation of the abstract and keywords

Після цього наводиться список використаних джерел **References** англійською мовою згідно з IEEE style (9 кегль).

Корисні посилання для здійснення транслітерації:

<http://translit.kh.ua/?passport> – автоматична транслітерація з української мови

<http://translate.meta.ua/ua/translit/> – автоматична транслітерація з російської мови

На окремому аркуші наводяться відомості про рецензента та авторів.

Рецензент: Прізвище, ім'я та по-батькові; посада; науковий ступінь та вчене звання; адреса електронної поштової скриньки; контактний телефон; ORCID ID у форматі: <https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

Автор: Прізвище, ім'я та по-батькові; посада; науковий ступінь та вчене звання; адреса електронної поштової скриньки; контактний телефон; ORCID ID у форматі: <https://orcid.org/0000-0000-0000-000X>

Комп'ютерна верстка: *Я.В. Ярошенко, С.М. Базіло*
Оформлення обкладинки *Ю.М. Коломісць*

Засновник і видавець Національний університет оборони України. Свідоцтво КВ № 24979-14919Р.
Ідентифікатор медіа R30-01154. Адреса редакції: 03049, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 28. Тел. (044) 271-05-88.
Підписано до друку 10.12.2024. Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. а. 15. Тираж 35 прим. Безкоштовно.
Надруковано у друкарні Національного університету оборони України.
