

# ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА

2(14)  
2017

## НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

ЩОКВАРТАЛЬНИК  
ВИДАЄТЬСЯ 3 СІЧНЯ 2014 РОКУ

Керівник проекту,  
голова редакційної ради

**І.Б. Чепков,**

д-р техн. наук

Редакційна колегія:

**С.В. Лапицький,** д.т.н., гол. ред.  
(ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

**М.І. Васківський,** д.т.н., заст. гол. ред.  
(ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

**В.В. Глєбов,** д.т.н. (ХКБМ)

**А.С. Довгопалій,** д.т.н. (ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

**В.В. Зубарєв,** д.т.н. (ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

**А.М. Зубков,** д.т.н. (НАСВ)

**О.П. Коростельов,** д.т.н. (ДержККБ «Луч»)

**Д.Б. Кучер,** д.т.н. (АВМС)

**Д.П. Кучеров,** д.т.н. (НАУ)

**Б.М. Ланецький,** д.т.н. (ХНУПС)

**М.І. Луханін,** д.т.н. (ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

**М.М. Мітрахович,** д.т.н.

(ДП «Івченко-Прогрес»)

**Б.О. Оліярник,** д.т.н. (ЛНДРТГ)

**П.П. Чабаненко,** д.в.н., (ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

**С.М. Гімбер,** секр. (ЦНДІ ОВТ ЗСУ)

Редакційна рада:

**Ю.А. Гусак,** д.в.н. (ВНУ ГШ ЗСУ)

**М.М. Шевцов** (ОЗСУ)

**Г.В. Пєвцов,** д.т.н. (ХНУПС)

**П.П. Ткачук,** д.іст.н. (НАСВ)

**І.В. Толок,** к.пед.н. (ДВОН МОУ)

**В.Б. Толубко,** д.т.н. (ДУТ)

**О.В. Харченко,** д.т.н. (ДНДІА)

Розглянуто та схвалено до друку  
науково-технічною радою  
ЦНДІ ОВТ ЗС України  
(протокол № 6 від 08.06.2017)  
Оригінальний макет виготовлено  
Видавничим домом Дмитра Бураго

Адреса редакції:

Україна, 03049, м. Київ,  
пр-т Повітрофлотський, 28  
Тел.: (044) 271-0966  
Факс: (044) 520-12-84  
E-mail: cndi\_ovt@mil.gov.ua

Свідомство про державну реєстрацію  
друкованого засобу масової інформації  
серія КВ №20209-10009Р від 20.08.2013

Журнал входить до переліку наукових видань  
Міністерства освіти і науки України  
(наказ №7-дск від 30.09.2014)



© ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2017

## У НОМЕРІ

### ВОЄННО-ТЕХНІЧНА ПОЛІТИКА

- Павловський І. В. Ключові реформи сектору безпеки і оборони та результати  
їхнього впровадження ..... 5
- Чепков І. Б., Зубарєв В. В., Смірнов В. О., Свергунов О. О. Глобальні  
тенденції в розвитку механізмів реалізації державної політики при імпорті  
озброєнь в умовах криз ..... 11

### БРОНЕТАНКОВА ТЕХНІКА

- Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Схабицький В. Р., Сливінський О. А.,  
Ханюков В. А. Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди  
ударниками з різною формою головної частини ..... 17

### АРТИЛЕРІЙСЬКЕ ТА СТРІЛЕЦЬКЕ ОЗБРОЄННЯ

- Чепков І. Б., Васківський М. І., Бісик С. П., Шереметов С. І., Корбач В. Г.  
Дослідження підриву мін у каналі ствола 120-мм міномета ..... 23
- Журавльов О. О., Коломійцев О. В., Герасимов С. В., Чумак Б. О. Метод  
оцінки значення похибки коефіцієнта сили лобового опору снаряда за  
результатами зовнішньотраєкторних вимірювань ..... 29

### РАДІОТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ

- Животовський Р. М. Аналіз методів оцінки каналів управління та передачі  
даних комплексів протиповітряної оборони ..... 34
- Кучер Д. Б., Фик О. І., Гончар Р. О. Моделювання процесу утворення  
електромагнітного поля надпровідними фрактальними частотно-вибірковими  
решітками у складі плоских дводзеркальних антен ..... 38

### ОЗБРОЄННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

- Войтенко С. Д., Жолобов О. В. Обґрунтування функціональної структури  
перспективного підвісного контейнера оптико-електронної розвідки ..... 51

### БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ КОМПЛЕКСИ

- Кучеров Д. П., Козуб А. М., Костина О. М. Управління мультиагентною  
системою в потенціальному полі ..... 55

### ТЕХНІКА ЗВ'ЯЗКУ

- Шефер О. В. Перспективи та особливості застосування плазми порожнистого  
катода для підвищення завадостійкості супутникових телекомунікацій ..... 62

### ТЕХНІКА ТА ОЗБРОЄННЯ ВІЙСЬКОВО-МОРСЬКИХ СИЛ

- Лейко О. Г., Дерєпа А. В., Кочарян О. О. Акустичні особливості  
інформаційної гідроакустичної системи «морське середовище –  
надводний корабель – гідроакустична станція» та можливості впливу на неї ..... 66
- Розгонаєв С. М., Чабаненко П. П. Підвищення інформативності й  
інваріантності класифікаційних ознак перевипромінюваних  
радіолокаційних сигналів надводним кораблем ..... 76

### ВИРОБНИЦТВО, МОДЕРНІЗАЦІЯ, РЕМОНТ

- Шишанов М. О., Гуляєв А. В., Зубарєв О. В., Шевцов М. М. Методологія  
обґрунтування тактико-технічних вимог до технічних засобів відновлення ... 80

### ЗБРОЯ НА НЕТРАДИЦІЙНИХ ПРИНЦИПАХ

- Кучер Д. Б., Смиринська Н. Б. Особливості конструкції пристрою формування  
послідовності потужних електромагнітних випромінювань в системах  
обмеженого об'єму ..... 84

- ІНФОРМАЦІЯ ..... 90

- РЕЗЮМЕ ..... 94

WEAPONS AND  
MILITARY EQUIPMENT

2(14)  
2017

SCIENTIFIC JOURNAL

QUARTERLY  
PUBLISHED SINCE JANUARY 2014

TABLE OF CONTENTS

MILITARY TECHNICAL POLICY

*Pavlovskiy I. V.* Key reforms of the security and defense sector and the results of their implementation ..... 5

*Chepkov I. B., Zubarev V. V., Smirnov V. O., Sverhunov O. O.* Global trends in building of the state policy at imports of arms in crisis ..... 11

ARMORED VEHICLES

*Bisyk S. P., Chernozubenko O. V., Shabitskiy V. R., Slivinskiy O. A., Hanyukov V. A.* Numerical simulations of homogeneous penetration obstacles projectiles with different form of nose ..... 17

ARTILLERY WEAPONS & SMALL ARMS

*Chepkov I. B., Vaskivskiy M. I., Bisyk S. P., Sheremetov S. I. Korbach V. G.* Research blast mines in the barrel 120 mm mortar ..... 23

*Zhuravliov O. O., Kolomiitsev O. V., Herasymov S. V., Chumak B. O.* Method of estimation of value errors coefficient of force of head-resistance of projectile on results of external trajectory measuring ..... 29

RADIO-TECHNICAL FACILITIES

*Zhyvotovskiy R. M.* Analysis of estimation methods for control and data channels in air defense systems ..... 34

*Kucher D. B., Fyk O. I., Honchar R. O.* Modeling of the process of formation of an electromagnetic field by superconducting fractal frequency-selective gratings in the composition of flat two-mirror antennas ..... 38

AIRCRAFT ARMAMENT & FACILITIES

*Voitenko S. D., Zholobov O. V.* Substantiation of functional design of the promising suspension containers with optical-electronic intelligence ..... 51

UAV

*Kucherov D. P., Kozub A. M., Kostyna O. M.* Movement of the multi agent system in potential field ..... 55

COMMUNICATIONS MEANS

*Shefer O. V.* The prospects and peculiarities of plasma with hollow cathode using for satellite telecommunications noise stability increase ..... 62

NAVY ARMAMENT & EQUIPMENT

*Leiko O. H., Derepa A. V., Kocharian O. O.* Acoustic properties of information hydroacoustic system «marine environment-surface vessel-hydroacoustic station» and ways to influence them ..... 66

*Rozhonayev S. N., Chabanenko P. P.* Increasing informativity and invariance of classification evidences of radar signals that were reflected from ship ..... 76

PRODUCTION, MODERNIZATION, MAINTENANCE

*Shyshanov M. O., Huliaiev A. V., Zubarev O. V., Shevtsov M. M.* Methodology of the substantiation of the tactical and technical requirements to technical recovery means ..... 80

UNCONVENTIONAL WEAPONS

*Kucher D. B., Smyrynska N. B.* Features of construction of device for forming the sequence of powerful electromagnetic radiations in systems of limited volume ..... 84

INFORMATION ..... 90

RESUME ..... 94

Project Manager,  
Editorial Director  
**Chepkov I.B.,**  
DEng

Editorial Board:

*Lapytskiy S.V.*, DEng, Chief Editor (CRI WME AFU)  
*Vaskivskiy M.I.*, DEng, (CRI WME AFU)  
*Glebov V.V.*, DEng (KMDB)  
*Dovhopolyi A.S.*, DEng (CRI WME AFU)  
*Zubarev V.V.*, DEng (CRI WME AFU)  
*Zubkov A.M.*, DEng (Hetman Petro Sahaidachnyi NAA)  
*Korostelyov O.P.*, DEng ("SKDB"Luch")  
*Kucher D.B.*, DEng (NNA)  
*Kucherov D.P.*, DEng (NAU)  
*Lanetskiy B.M.*, DEng (KNUAF)  
*Lukhanin M.I.*, DEng (CRI WME AFU)  
*Mitrakhovych M.M.*, DEng (SE Ivchenko-Progress)  
*Oliyarnyk B.O.*, DEng (SE LRERI)  
*Chabanenko P.P.*, DScMil, (CRI WME AFU)  
*Himber S.M.*, secretary, (CRI WME AFU)

Editors:

*Husak Yu.A.*, DScMil (MSD GS AFU)  
*Shevtsov M.M.* (AAFU)  
*Pyevtsov H.V.*, DEng (KNUAF)  
*Tkachuk P.P.*, DSc (Hetman Petro Sahaidachnyi NAA)  
*Tolok I.V.*, Cand. Sc. (DMES MoD of Ukraine)  
*Tolubko V.B.*, DEng (SUT)  
*Kharchenko O.V.*, DEng (SRIA)

Reviewed and approved for publication by  
Science and Engineering Board  
(record No.6 of 08.06.2017)

Original dummy copy was made  
by Dmitry Burago Publishing House

Editorial address:

Ukraine, 03049, Kyiv  
28, Povitroflotky Ave  
tel.: (044) 271-0966  
fax: (044) 520-12-84  
E-mail: cndi\_ovt@mil.gov.ua

Printed Medium State Registration Certificate  
serial No. KB 20209-10009R of 20.08.2013

Journal is in the list of scientific professional  
publications of the Ministry of Education and  
Science of Ukraine  
(order No.7-FOUO of 30.09.2014)



Шановні читачі!

24 липня 2017 року виповнюється 20 років з дня заснування Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України.

Напередодні цієї знаменної дати хочу нагадати, що інститут визначений головною науково-дослідною установою державного Замовника – Міністерства оборони України з питань розробки та закупівлі озброєння та військової техніки для Збройних Сил України.

За 20 років свого існування інститут посів достойну та досить міцну позицію в системі військово-технічної науки держави.

Фахівці інституту беруть провідну участь у формуванні основних напрямів воєнно-технічної політики нашої держави, розробці Державних цільових оборонних програми з розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України, проводять наукові дослідження з визначення технічного обрисів зразків озброєння та вимог до них, здійснюють науково-технічне супроводження науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, беруть безпосередню участь у державних випробуваннях зразків озброєння та військової техніки.

Давайте побажаємо керівництву та співробітникам інституту міцного здоров'я, щастя, благополуччя, подальших успіхів у науковій праці на благо України!



**І.Б. ЧЕПКОВ,**  
*Керівник проекту  
доктор технічних наук,  
професор*



**I.B. CHEPKOV,**

*Project Leader*

*Doctor of Engineering Science*

*Professor*

Dear readers,

July 24, 2017 is the 20th foundation anniversary of the Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine.

On the eve of the memorable event I would like to remind you that the Institute is the main research organization of the state Customer – the Ministry of Defence of Ukraine on development and purchase of armament and military equipment for the Armed Forces of Ukraine.

For the 20 years the Institute has occupied the meaningful and significant place in the system of the state military and technical science.

The Institute experts take the leading part in creation of the main directions of military and technical policy of our state, development of State Target Defence Programs on development of armament and military equipment of the Armed Forces of Ukraine as well as make researches on definition of technical outline of the armament samples and requirements to them. They provide scientific and technical support of both research and research and construction activities, participate in state trials of armament and military equipment samples.

Let strong health, happiness, welfare and success attend the Institute management and experts in their research work to the benefit of Ukraine!



УДК 356.35

**І. В. ПАВЛОВСЬКИЙ,***заступник Міністра оборони України  
(Міністерство оборони України, м. Київ)*

## Ключові реформи сектору безпеки і оборони та результати їхнього впровадження

*Проведено аналіз загроз у сфері національної безпеки, основних завдань підвищення рівня обороноздатності держави та реформування оборонної сфери. Визначено вирішальні для забезпечення національної безпеки України аспекти управлінської діяльності, що потребують подальшої імплементації.*

*Ключові слова: національна безпека, рівень обороноздатності, воєнна агресія, реформування сил оборони, управлінський інструментарій.*

*Проведен анализ угроз в сфере национальной безопасности, основных задач повышения уровня обороноспособности государства и реформирования оборонной сферы. Определены решающие для обеспечения национальной безопасности Украины аспекты управленческой деятельности, которые нуждаются в дальнейшей имплементации.*

*Ключевые слова: национальная безопасность, уровень обороноспособности, военная агрессия, реформирование сил обороны, управленческий инструментарий.*

Своєрідність політичної і економічної ситуації в країні на нинішньому історичному етапі викликана надзвичайними подіями, що призвели до таких наслідків:

порушення її територіальної цілісності, анексії значної частини території;

виникнення в південно-східному регіоні збройного конфлікту за участю іноземної держави, що володіє значними економічними та військовими можливостями, включаючи наявність у неї ядерної зброї та засобів її доставки на стратегічну дальність;

втрати суттєвого економічного потенціалу;

реальної загрози незалежності та державному суверенітету України, необхідності їх захисту, у тому числі й воєнним шляхом.

Дані обставини зумовили прийняття керівництвом держави цілої низки політичних рішень, основоположними з яких є:

відмова України від позаблокового статусу [1];

визнання Російської Федерації країною-агресором [2].

У законодавчому полі ці політичні рішення знайшли своє відображення у відповідних змінах до Законів України «Про основи національної безпеки України» [3] та «Про засади внутрішньої і зовнішньої політики» [4] стосовно віднесення:

інтеграції України в європейський політичний, економічний, правовий простір з метою набуття членства в Європейському Союзі до пріоритетів її національних інтересів;

поглиблення співпраці з Організацією Північноатлантичного договору з метою досягнення критеріїв, необхідних для набуття членства в цій організації, до основних напрямів державної політики з питань національної безпеки.

Така направленість головного вектора подальшого розвитку країни вимагає принципово нових теоретичних і практичних підходів до формування сучасної безпекової та воєнної політики, суть яких розкривається в трьох нещодавно прийнятих документах, що за своїм змістом органічно пов'язані між собою, а саме:

третій редакції Стратегії національної безпеки України [5];

четвертій редакції Воєнної доктрини України [6];

Концепції розвитку сектору безпеки і оборони України [7].

Змістова єдність зазначених документів визначається такими положеннями чинної редакції Стратегії національної безпеки України:

забезпечення національної безпеки потребує якісної нової державної політики, спрямованої на ефективний захист національних інтересів в економічній, соціальній, гуманітарній та інших сферах, комплексне реформування системи забезпечення національної безпеки та створення ефективного сектору безпеки і оборони України;

запорукою національної безпеки і відновлення територіальної цілісності України є потужні Збройні Сили України, інші утворені відповідно до законів України військові формування, що забезпечені сучасним озброєнням і військовою технікою, активна

зовнішньополітична діяльність, ефективні розвідувальні, контррозвідувальні і правоохоронні органи.

Таким чином, мова йде про глибинне перетворення безпекової та оборонної сфер, що включає:

1) комплексне реформування всієї системи національної безпеки до рівня, прийнятного для членства в Європейському Союзі й НАТО;

2) подальший розвиток Збройних Сил України за західними стандартами та досягнення сумісності із збройними силами держав-членів НАТО;

3) створення ефективного сектору безпеки і оборони, що має достатню здатність для відновлення територіальної цілісності нашої країни, гарантування її мирного майбутнього як суверенної і незалежної держави, забезпечення своєчасного виявлення зовнішніх та внутрішніх загроз, запобігання їм та їхньої нейтралізації, оперативного спільного реагування на кризові та надзвичайні ситуації, у тому числі за рахунок:

створення ефективної системи управління сектором безпеки і оборони як цілісною функціональною системою;

об'єднання оперативних спроможностей його складових частин для забезпечення своєчасного і адекватного реагування на кризові явища;

постійного підтримання сил безпеки та оборони в готовності до виконання завдань за призначенням;

удосконалення системи планування, забезпечення раціонального використання державних ресурсів.

При цьому необхідно враховувати, що найбільш актуальними загрозами війсьній безпеці України залишаються агресивні дії Російської Федерації, що чиняться для знищення нашої держави і захоплення її території, у тому числі шляхом:

прямой війсьній агресії, тимчасової окупації території Автономної Республіки Крим і міста Севастополя;

здійснення спроб подальшої дестабілізації обстановки в Азовсько-Чорноморському регіоні;

створення та всебічної підтримки, зокрема війсьної, маріонеткових квазідержавних утворень на тимчасово окупованій території частини Донецької та Луганської областей;

участі регулярних російських військ, радників, інструкторів і найманців у бойових діях на території України;

проведення ними розвідувально-підривної та диверсійної діяльності;

нарощування військових угруповань біля кордонів України та на її тимчасово окупованій території, у тому числі розміщення на півострові Крим тактичної ядерної зброї тощо.

Ще більше ускладнює воєнно-політичну ситуацію навколо України наявність таких деструктивних тенденцій:

поширення практики «гібридних» воєн, використання спеціальних операцій та дій провокаційного характеру для створення конфліктних ситуацій;

посилення внутрішньої нестабільності в сусідніх державах, викликаній втручанням з боку інших держав;

посилення мілітаризації в регіоні довкола України, збільшення іноземної військової присутності на територіях її сусідів;

активна дестабілізуюча зовнішня політика Російської Федерації щодо сусідніх держав, а також щодо міжнародних організацій, включаючи НАТО та ЄС;

ухилення Російської Федерації від виконання зобов'язань за міжнародними договорами у сфері контролю над озброєннями;

інтенсивна модернізація окремими країнами власних збройних сил, активізація розробок озброєння та військової техніки нового покоління з принципово новими можливостями вогневого ураження та управління;

модернізація та вдосконалення іноземними спеціальними службами систем і комплексів технічної розвідки, нарощування їх можливостей, спроби несанкціонованого доступу до об'єктів інформаційної інфраструктури України;

гальмування процесу договірно-правового оформлення державних кордонів та розмежування виключних (морських) економічних зон і континентального шельфу між країнами;

інформаційна війна Російської Федерації проти України тощо.

У відповідності до вищезазначених керівних нормативно-правових актів основними завданнями підвищення рівня обороноздатності держави на сучасному етапі є:

підвищення здатності органів державної влади, військового управління та органів місцевого самоврядування, сил оборони, системи цивільного захисту, оборонно-промислового комплексу до функціонування в умовах кризових ситуацій та особливого періоду;

реформування сил оборони з орієнтацією на створення високоефективних боєздатних підрозділів Збройних Сил України, інших військових формувань, забезпечення пріоритету їх якісних, а не кількісних характеристик;

створення потужного військового резерву, готового до швидкого розгортання і здатного виконувати завдання за призначенням;

удосконалення системи мобілізаційної підготовки та системи територіальної оборони;

державна підтримка перспективних фундаментальних і прикладних наукових досліджень в інтересах національної безпеки і оборони;

модернізація й випереджувальний розвиток оборонно-промислового комплексу, нарощування його експериментальних і виробничих потужностей, призначених для розроблення та виготовлення сучасного озброєння та військової техніки;

поглиблення військово-технічного співробітництва з іноземними державами, насамперед країнами-членами НАТО та Європейського Союзу.

Зважаючи на комплексний і багатогранний характер порушеної проблеми, зупинимось лише на реалізації її окремих аспектів, що безпосередньо стосуються Міністерства оборони.

Концепція розвитку сектору безпеки і оборони України, що затверджена Указом Президента України від 14

березня 2016 року № 92/2016, встановлює такі напрями реформування Збройних Сил України:

- оптимізацію структури та чисельності ЗС України;
- відновлення технічної готовності озброєння, військової та спеціальної техніки, модернізація та оновлення їхнього складу;

- удосконалення системи підготовки військ (сил) та системи їхнього оперативного (бойового) та матеріально-технічного забезпечення;

- забезпечення сумісності з іншими складовими сектору безпеки і оборони в спільних діях у рамках визначених сценаріїв;

- поступове наближення ЗС України за показниками підготовки, технічного оснащення та всебічного забезпечення до стандартів НАТО.

Кожний напрям складається із сукупності відповідних заходів, хронологія здійснення яких поділяється на два етапи:

1) перший етап (до кінця 2017 року):

- оптимізація та нарощування бойових спроможностей наявних та формування нових військових частин;

- реформування системи управління військами (силами) для забезпечення управління міжвидовими об'єднаннями ЗС України;

- створення Сил спеціальних операцій як окремого роду військ за напрямами, визначеними Концепцією формування та розвитку Сил спеціальних операцій;

- створення нових функціональних структур ЗС України (сил негайного реагування, сил нарощування, сил резерву);

- підготовка сил негайного реагування для прикриття державного кордону України, стримування, локалізації, ліквідації (нейтралізації) можливого збройного конфлікту;

- підготовка сил нарощування для посилення (збільшення) угруповань військ (сил) при ліквідації можливого збройного конфлікту або відбитті збройної агресії;

- підготовка сил резерву для використання в особливий період та/або під час проведення антитерористичної операції, а також для надання допомоги під час стихійних лих та техногенних катастроф;

- відновлення військової інфраструктури з урахуванням сучасного безпекового середовища;

- створення ефективної системи мобілізації та мобілізаційної підготовки;

- створення належних умов для забезпечення поступового комплектування Збройних Сил України військовослужбовцями за контрактом;

- досягнення рівня здатності військ (сил) до адекватного реагування на загрози прикордонного збройного конфлікту і збереження спроможності до нарощування оперативних можливостей в особливий період для відбиття збройної агресії проти України;

- підвищення бойового потенціалу, відновлення справності, продовження ресурсу, проведення модернізації, створення нових систем і уніфікації зразків озброєння та військової техніки;

- формування підрозділів забезпечення кібербезпеки та кіберзахисту Збройних Сил України, здійснення

міжвідомчої координації з цих питань в інтересах забезпечення обороноздатності держави;

2) другий етап (до кінця 2020 року):

- підтримання та нарощування боєздатності військових частин постійної готовності відповідно до стандартів НАТО;

- переведення органів військового управління ЗС України на J-структуру, прийняту за основу в штабах країн-членів НАТО;

- подальше оснащення ЗС України модернізованим і новим озброєнням та військовою технікою з урахуванням потреб і визначених пріоритетів;

- удосконалення системи забезпечення інформаційної безпеки Міністерства оборони та ЗС України;

- удосконалення системи підготовки військ (сил), досягнення показників бойової підготовки за стандартами НАТО;

- організація розроблення сучасних зразків озброєння і військової техніки, засобів зв'язку, інформатизації та захисту інформації;

- посилення спроможностей та рівня готовності сил спеціальних операцій, сил негайного реагування, сил нарощування та сил резерву до виконання завдань за призначенням;

- упровадження сучасних систем і технологій всебічного забезпечення військ (сил).

Важливу роль у зміцненні обороноздатності держави грає підвищення рівня взаємодії між Збройними Силами України, іншими збройними формуваннями, з одного боку, й вітчизняною промисловістю, з іншого боку.

Останнім часом це стало можливим вирішальним чином завдяки діяльності:

1) Ради національної безпеки і оборони України, що ініціювала прийняття та реалізацію указів Президента України щодо найбільш актуальних аспектів сучасної воєнно-економічної, військово-технічної та оборонно-промислової політики:

від 13 травня 2014 року № 468/2014 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 28 квітня 2014 року «Про заходи щодо підвищення ефективності планування в секторі безпеки і оборони» [8];

від 27 серпня 2014 року № 691/2014 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 27 серпня 2014 року «Про заходи щодо удосконалення державної військово-технічної політики» [9];

від 3 листопада 2014 року № 842/2014 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 12 вересня 2014 року «Про комплекс заходів щодо зміцнення обороноздатності держави та пропозиції до проекту Закону України «Про Державний бюджет України на 2015 рік» по статтях, пов'язаних із забезпеченням національної безпеки і оборони України» [10] тощо;

2) Міжвідомчої комісії з питань оборонно-промислового комплексу, що створена Указом Президента України від 12 червня 2015 року № 329/2015 [11] і внаслідок свого функціонального призначення тримає на постійному контролі всі поставки озброєння та військової техніки до Збройних Сил України, інших військових формувань.

При цьому особлива увага приділяється економічним питанням, оскільки проблема обмеженості ресурсів не зникла з порядку денного, навпаки, вона тільки загострюється.

До подій 2013–2014 років значна частина правового поля відносин армії і промисловості регулювалася такими законодавчими та нормативно-правовими актами:

Законами України «Про організацію оборонного планування» [12], «Про державне оборонне замовлення» [13];

Порядком планування, формування, розміщення та коригування державного оборонного замовлення, а також здійснення контролю за його виконанням, що затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 27 квітня 2011 року № 464 «Питання державного оборонного замовлення»;

постановою Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2006 року № 1404 «Питання попередньої оплати товарів, робіт і послуг, що закуповуються за бюджетні кошти» тощо.

Однак ситуація, в яку потрапила наша країна взимку–навесні 2014 року, вийшла за межі, передбачені в зазначеному правовому полі, і вимагала прийняття найрішучіших заходів.

Тому в стислі терміни Верховною Радою України і урядом:

1) внесені необхідні зміни до таких документів:

Законів України «Про організацію оборонного планування», «Про державне оборонне замовлення»;

Порядку планування, формування, розміщення та коригування державного оборонного замовлення, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 27 квітня 2011 року № 464;

2) на заміну постанови Кабінету Міністрів України від 9 жовтня 2006 року № 1404 прийнята нова постанова від 23 квітня 2014 року № 117 «Про здійснення попередньої оплати товарів, робіт і послуг, що закуповуються за бюджетні кошти».

Це дозволило своєчасно і оперативно налагодити матеріально-технічне постачання антитерористичної операції, вирішити багато інших нагальних проблем військового будівництва, у тому числі:

забезпечення учасників АТО бронежилетами та кулехисними шоломами, іншим речовим майном (постанови Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2014 року № 536 та від 4 березня 2015 року № 102);

організацію відновлення, модернізації та ремонту озброєння, військової та спеціальної техніки, їх закупівлі в умовах особливого періоду, надзвичайного стану або у період проведення антитерористичної операції (постанови Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2014 року № 536, від 12 листопада 2014 року № 619 та від 9 грудня 2015 року № 1041);

спорудження фортифікаційних укріплень у зоні АТО та на державному кордоні (постанова Кабінету Міністрів України від 10 вересня 2014 року № 448);

протезування та ортезування учасників АТО виробами підвищеної функціональності за новітніми технологіями, що відсутні в Україні (постанови Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2014 року № 518, від 8 липня 2015 року № 465 та від 24 лютого 2016 року № 172) тощо.

Робота з удосконалення економічних механізмів в оборонній сфері триває далі:

у минулому році набув чинності дуже важливий для нас Порядок формування ціни на продукцію, роботи, послуги оборонного призначення (постанови Кабінету Міністрів України від 8 серпня 2016 року № 517 та від 14 грудня 2016 року № 942);

вдосконалювався алгоритм формування державного оборонного замовлення, а також процедура попередньої оплати продукції, робіт і послуг, що закуповуються в його межах (постанови Кабінету Міністрів України від 8 вересня 2016 року № 618, від 26 жовтня 2016 року № 746 та від 30 листопада 2016 року № 891);

визначені певні заходи щодо впорядкування нормування інженерної праці тощо.

Проте передчасно робити висновки щодо благополуччя у військово-технічній та оборонно-промисловій сферах. На вирішення чекає низка важливих питань.

Відомо, що рівень забезпечення національної безпеки України залежить, насамперед, від ефективності функціонування відповідних органів державної влади, чіткого розподілу відповідальності й повноважень у визначених сферах діяльності та налагодженої взаємодії між ними. Вирішальним чином це досягається за рахунок:

своєчасного оновлення концептуальних та доктринальних засад підготовки та застосування сил безпеки та сил оборони;

узгодження концепцій, стратегій і програм реформування та розвитку складових сектору безпеки і оборони, а також вітчизняного оборонно-промислового комплексу;

удосконалення бюджетної політики за рахунок раціонального розподілу оборонних видатків;

застосування програмно-цільового підходу до визначення обсягів фінансових і матеріально-технічних ресурсів, необхідних для ефективного функціонування сектору безпеки і оборони.

І якщо перша із зазначених умов виконується шляхом внесення актуальних змін до законів України «Про основи національної безпеки України», «Про засади внутрішньої і зовнішньої політики», «Про оборону України» [14], «Про Збройні Сили України» [15], «Про державне оборонне замовлення», «Про організацію оборонного планування», прийняття третьої редакції Стратегії національної безпеки України, четвертої редакції Воєнної доктрини України та Концепції розвитку сектору безпеки і оборони України, то з реалізацією останніх трьох зберігається деяка невизначеність.

Стурбованість Міністерства оборони України з цього приводу пояснюється тим, що воно, внаслідок прагнення до поглиблення співпраці з Організацією Північноатлантичного договору, вкрай зацікавлене у впровадженні методу програмного планування оборонних

витрат (система ППБ: «Планування – Програмування – Розробка бюджету»), що вже давно й широко застосовується в усіх країнах-членах НАТО.

Зміст цього управлінського інструментарію полягає в наявності між етапами планування та реалізації ще одного етапу розробки відповідних програм за найбільш важливими напрямками військового будівництва, матеріально-технічного забезпечення та технічного оснащення збройних сил, розвитку науково-технічних та виробничих можливостей оборонної промисловості, що дозволяє більш об'єктивно враховувати існуючі ресурсні обмеження. Централізуючи та забезпечуючи як задоволення поточних потреб збройних сил, так й планомірну реалізацію перспективних програм їхнього розвитку, дана система інтегрує в собі практично всі процеси військового будівництва, поєднує різноманітні та різнотипні алгоритми оборонного планування в єдиний науково-методичний апарат, який:

забезпечує безперервність та оптимальність управління за рахунок вироблення раціональних та обґрунтованих рішень;

гнучко реагує на динаміку змін у військово-технічній та оборонно-промисловій політиці;

ефективно сприяє скороченню строків здійснення робіт та економії ресурсів.

Наприклад, у США за допомогою середньострокової п'ятирічної програми життєдіяльності міністерства оборони та низки підпрограм окремих напрямів військового будівництва система ППБ дозволяє значною мірою підвищити рівень обґрунтованості та оптимальності оборонних видатків.

В українських умовах, де роль перспективної програми зміцнення обороноздатності держави могла би виконувати вищезазначена Концепція розвитку сектору безпеки і оборони України, а її підпрограм – Державна цільова оборонна програма розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України на період до 2020 року та Державна цільова програма реформування та розвитку оборонно-промислового комплексу України на період до 2020 року, також мають бути об'єктивні можливості для такого роду оптимізації.

Однак ці можливості залишаються невикористаними через такі причини. Державна цільова оборонна програма розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України на період до 2020 року, концепція якої схвалена Кабінетом Міністрів України в липні 2015 року [16], вже в березні наступного року була затверджена [17]. У той же час, незважаючи на те, що концепція Державної цільової програми реформування та розвитку оборонно-промислового комплексу України на період до 2020 року була схвалена у січні минулого року [18], самої програми немає донині. У результаті, оборонний бюджет України на 2017 рік формувався старим способом, досить далеким від методології, прийнятої в НАТО.

Даний приклад наочно демонструє, що, не дивлячись на значні зусилля, що вживаються для виведення обороноздатності держави на якісно новий рівень, у нас ще є над чим працювати.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо відмови України від здійснення політики позаблоковості : Закон України від 23 грудня 2014 року № 35-VIII // Офіційний вісник України. 2015. № 2. С. 7.
2. Про Звернення Верховної Ради України до Організації Об'єднаних Націй, Європейського Парламенту, Парламентської Асамблеї Ради Європи, Парламентської Асамблеї НАТО, Парламентської Асамблеї ОБСЄ, Парламентської Асамблеї ГУАМ, національних парламентів держав світу про визнання Російської Федерації державою-агресором : постанова Верховної Ради України від 27 січня 2015 року № 129-VIII // Офіційний вісник України. 2015. № 9. С. 21.
3. Про основи національної безпеки України : Закон України від 19 червня 2003 року № 964-IV // Офіційний вісник України. 2003. № 29. С. 38.
4. Про засади внутрішньої і зовнішньої політики : Закон України від 1 липня 2010 року № 2411-VI // Офіційний вісник України. 2010. № 55. С. 17.
5. Стратегія національної безпеки України : затверджено Указом Президента України від 26 травня 2015 року № 287/2015 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 6 травня 2015 року «Про Стратегію національної безпеки України» // Офіційний вісник України. 2015. № 13. С. 50.
6. Воєнна доктрина України : затверджено Указом Президента України від 24 вересня 2015 року № 555/2015 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 2 вересня 2015 року «Про нову редакцію Воєнної доктрини України» // Офіційний вісник України. 2015. № 22. С. 19.
7. Концепція розвитку сектору безпеки і оборони України : затверджено Указом Президента України від 14 березня 2016 року № 92/2016 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 4 березня 2016 року «Про Концепцію розвитку сектору безпеки і оборони України» // Офіційний вісник України. 2016. № 23. С. 12.
8. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 28 квітня 2014 року «Про заходи щодо підвищення ефективності планування в секторі безпеки і оборони» : Указ Президента України від 13 травня 2014 року № 468/2014 // Офіційний вісник України. 2014. № 20. С. 19.
9. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 27 серпня 2014 року «Про заходи щодо удосконалення державної військово-технічної політики : Указ Президента України від 27 серпня 2014 року № 691/2014 // Офіційний вісник Президента України. 2014. № 37. С. 18.
10. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 12 вересня 2014 року «Про комплекс заходів щодо зміцнення обороноздатності держави та пропозиції до проекту Закону України «Про

- Державний бюджет України на 2015 рік» по статтях, пов'язаних із забезпеченням національної безпеки і оборони України»: Указ Президента України від 3 листопада 2014 року № 842/2014 // Офіційний вісник України. 2014. № 89. С. 11.
11. Про Міжвідомчу комісію з питань оборонно-промислового комплексу : Указ Президента України від 12 червня 2015 року № 329/2015 // Офіційний вісник України. 2015. № 48. С. 8.
  12. Про організацію оборонного планування : Закон України від 18 листопада 2004 року № 2198-IV // Офіційний вісник України. 2004. № 50. С. 20.
  13. Про державне оборонне замовлення : Закон України від 3 березня 1999 року № 464-XIV // Офіційний вісник України. 1999. № 13. С. 1.
  14. Про оборону України : Закон України від 6 грудня 1991 року № 1932-XII // Відомості Верховної Ради України. 1992. № 9. С. 106.
  15. Про Збройні Сили України : Закон України від 6 грудня 1991 року № 1934-XII // Відомості Верховної Ради України. 1992. № 9. С. 108.
  16. Про схвалення Концепції Державної цільової оборонної програми розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України на період до 2020 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 липня 2015 року № 758-р.
  17. Про затвердження Державної цільової оборонної програми розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України на період до 2020 року : постановою Кабінету Міністрів України від 30 березня 2016 року № 284-6.
  18. Про схвалення Концепції Державної цільової програми реформування та розвитку оборонно-промислового комплексу України на період до 2020 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 січня 2016 року № 19-р // Офіційний вісник України. 2016. № 7. С. 116.

**Рецензент М. І. Луханін**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)

УДК 355.02: 355.44

**І. Б. ЧЕПКОВ**, доктор технічних наук, професор,  
**В. В. ЗУБАРЄВ**, доктор технічних наук,  
 професор,

**В. О. СМІРНОВ**, кандидат технічних наук,  
 старший науковий співробітник  
 (Центральний науково-дослідний інститут  
 озброєння та військової техніки Збройних Сил  
 України, м. Київ),

**О. О. СВЕРГУНОВ**, кандидат технічних наук,  
 доцент  
 (Національний інститут стратегічних  
 досліджень)

## Глобальні тенденції в розвитку механізмів реалізації державної політики при імпорті озброєнь в умовах криз

*Проаналізовано зміни в розвитку механізмів реалізації державної політики при імпорті озброєнь, що виникли в останні роки в результаті глобальних змін у сфері військово-технічного співробітництва між державами, а також наявності глобальних економічних, фінансових та політичних криз. Запропоновано методологічний підхід до оцінки ефективності державної політики при імпорті озброєнь, який базується на методі експертних оцінок. Виявлені найбільш важливі складові політичних, військово-технічних і економічних механізмів при реалізації державної політики у сфері військово-технічного співробітництва між державами при імпорті озброєнь.*

*Проанализированы изменения в развитии механизмов реализации государственной политики при импорте вооружений, которые возникли в последние годы в результате глобальных изменений в сфере военно-технического сотрудничества между государствами, а также наличия глобальных экономических, финансовых и политических кризисов. Предложен методологический подход к оценке эффективности государственной политики при импорте вооружений.*

Стан військово-технічного співробітництва (ВТС) в умовах глобалізації аналізувався рядом авторів, зокрема [1, 2]. Однак зростання вартості високотехнологічних систем озброєнь, кризові явища в економіці, зміни воєнно-стратегічних балансів сил та поява нових товарів військового призначення (ТВП) суттєво змінили ринки озброєнь [3, 4]. У таких умовах провідні імпортери почали змінювати не тільки стратегії імпорту озброєння, військової та спеціальної техніки (ОВСТ), а й офсетну політику [5]. У рамках такої політики провідні імпортери ТВП у другому десятилітті ХХІ ст. почали формувати нові механізми імпорту ОВСТ, що комплексно враховують питання забезпечення національної безпеки і оборони, розвиток оборонної промисловості (ОП) або економіки держави. При цьому при підготовці проектів з імпорту ОВСТ використовуються політичні, військово-технічні та економічні механізми. Це обумовлює, з наукового погляду, актуальність дослідження змін таких механізмів. З практичного погляду актуальність досліджень механізмів імпорту озброєнь обумовлена необхідністю вивчення світового досвіду для застосування його в Україні при імпорті ОВСТ для технічного оснащення власних Збройних Сил (ЗС) та інших військових формувань.

Метою роботи є вивчення змін на глобальних ринках в розвитку механізмів реалізації державної політики при імпорті озброєнь для збільшення ефективності оборонних витрат та запровадження результатів досліджень для корегування політики імпорту ОВСТ в Україні.

У подальшому проаналізуємо світовий досвід з реалізації проектів імпорту високотехнологічних ОВСТ (літаків, кораблів, систем ППО/ПРО тощо), що мають ряд особливостей:

велика значимість таких систем у системах забезпечення національної безпеки і оборони [6, 7];

висока вартість одного проекту (сотні мільйонів доларів США та більше) [6, 7]. Наприклад, загальна сума проекту відновлення підводного флоту Австралії оцінюється в значну суму – понад 30 млрд. дол. США [8]. Проект імпорту в КНР ЗРС С-400 оцінюється в суму близько трьох мільярдів доларів США [9];

довгостроковий термін підготовки та укладання угоди і її реалізації (декілька років). Наприклад, у квітні 2015 року в ЗМІ було оголошено, що КНР та РФ у вересні 2014 року уклали контракт на закупівлю ЗРС С-400 у комплекті трьох полків (шість дивізіонів), поставки повинні початися в 2017 році [9]. Міністерство оборони Бельгії ще в червні 2014 року почало підготовку процедури закупівлі винищувачів нового покоління, призначених для заміни літаків F-16АМ, що планується зняти з озброєння, починаючи з 2023 року [10];

тривалі терміни виготовлення (3 та більше років). Наприклад, «Біла книга» Австралії 2009 року передбачає будівництво та введення до бойового складу протягом 20 років 12 неатомних підводних човнів (НАПЧ) для відновлення корабельного складу підводних сил Австралії, який нині нараховує 6 НАПЧ типу Collins [8]. Підводні човни Collins побудовані в 1990–2003 роках. Зняття з озброєння заплановано в 20-х роках ХХІ ст.;

складні системи логістичного забезпечення, підготовки кадрів для бойового застосування та сервісного обслуговування. Наприклад, Індія в рамках офсетних програм при імпорті вертольотів типу Mi-8/17 забезпечила будівництво компаніями РФ центру із сервісного обслуговування та ремонту вертольотів в Індії;

тривалі терміни експлуатації (до декількох десятиків років) імпортованих ОВСТ та необхідність протягом цих термінів компаніям-експортерам забезпечити технічну та сервісну підтримку і поставку запасних частин. Наприклад, Індія в рамках тендера по програмі MMRCA (Medium Multi Role Combat Aircraft) вимагала від компаній-експортерів гарантії підтримки терміну експлуатації літаків до 40 років.

Тому імпорт таких систем для всіх держав потребує комплексного підходу в діяльності держав-імпортерів ОВСТ з погляду оптимізації витрат великих сум коштів та отримання необхідної бойової ефективності протягом великого часу в умовах сильної міжнародної конкуренції на ринках озброєнь. Для реалізації проектів імпорту високотехнологічних систем ОВСТ в державах-імпортерах використовують комплексну систему механізмів, що включають: політичні, військово-технічні та економічні механізми (рис. 1).

**Політичні механізми.** У залежності від країни, оцінка та прийняття воєнно-політичного рішення щодо необхідності імпорту високотехнологічних систем ОВСТ у державах-імпортерах, визначення цілей та завдань імпорту необхідних систем ОВСТ здійснюється на рівні урядів або парламентів країн. Це можуть бути довгострокові стратегічні програми розвитку ЗС або програми з реалізації окремих проектів. Як ілюстрацію цих політичних механізмів наведемо декілька прикладів.

1. Наприкінці 2015 року міністерський комітет Бельгії затвердив Стратегічний план закупівель ОВСТ строком на 15 років до 2030 року, представлений міністерством оборони, на суму € 9,2 млрд. (10 млрд. дол. США). Цей план на 15 років передбачає витрати на оборону в розмірі 1,6% ВВП. Найбільшою програмою в рамках зазначеного плану закупівель стане придбання винищувачів, покликаних замінити 56 наявних застаріваючих винищувачів компанії Lockheed Martin F-16AM/BM. У грудні 2015 року міністр оборони Бельгії заявляв, що в бюджеті захищеним рядком надано 3,5 млрд. євро для закупівлі 34 літаків для заміни літаків F-16 у період 2023–2029 років – це ціна без витрат на експлуатацію, озброєння, запчастини і документацію, навчання

персоналу. З урахуванням строку експлуатації нових винищувачів протягом 40 років (до 2058 року) вартість програми закупівлі та експлуатації нових винищувачів ВПС Бельгії може досягти близько 15 млрд. євро (16,4 млрд. дол. США). Витрати на закупівлі ОВСТ будуть здійснюватися за рахунок скорочення чисельності ЗС Бельгії, що з 32000 осіб в 2016 році скоротяться до 25000 осіб у 2030 році.

2. В Індії рішення щодо фінансування програм закупівель, у тому числі імпортних, приймає міністерська рада з оборонних закупок (Defence Acquisition Council, DAC), яку очолює міністр оборони. Остаточного затверджує програми імпортних закупівель комітет з національної безпеки уряду Індії (CCS) під головуванням прем'єр-міністра.

3. Міністр оборони Фінляндії 20 жовтня 2015 року заявив про прийняте на політичному рівні країни рішення почати програму придбання нових винищувачів, призначених для заміни застарілих 55 винищувачів F/A-18C і семи F/A-18D, що знаходяться на озброєнні із середини 90-х років XX століття. Строк експлуатації цих літаків закінчується в кінці 20-х років XXI століття. Продовження їх експлуатації визнано нерентабельним. Заміна парку таких винищувачів оцінюється в 6 млрд. євро. Нові винищувачі стануть найдорожчим придбанням для МО Фінляндії в наступне десятиліття. Згідно із заявою МО для реалізації програми буде потрібно асигнувати додаткові засоби, оскільки здійснити її в рамках поточних витрат на оборону неможливо.

4. Болгарський уряд довгий час через фінансову кризу відкладав закупівлю винищувачів для ВПС, незважаючи на бажання міністерства оборони (МО) прискорити цей процес для заміни винищувачів радянського виробництва. Тільки 1 квітня 2016 року болгарським урядом була затверджена програма з придбання нових винищувачів. Вона передбачає як перший етап укладання міжурядової угоди з іноземною стороною з придбання Болгарією восьми винищувачів JAS-39 «Грипен» у період 2018–2021 років. Раніше урядом і парламентом Болгарії був схвалений бюджет в 1,5 млрд. левів (767 млн. євро) на придбання восьми винищувачів першого етапу. У тому числі 10 млн. левів повинні були бути надані в 2016 році, по 200 млн. левів – в 2017, 2018 і 2019 роках, 440 млн. левів – в 2020 році та 450 млн. левів – в 2021 році. Усього міністерство оборони Болгарії прагне придбати 16 винищувачів, у тому числі вісім на зазначеному першому етапі, а вісім – на другому етапі в



Рис. 1. Система механізмів з реалізації проектів імпорту високотехнологічних систем ОВСТ



2022–2023 роках. У рамках наданих фінансових ресурсів повинні бути закуплені не тільки бойові літаки, але й озброєння для них, устаткування для обслуговування літаків, допоміжне устаткування, системи планування й аналізу польотів, запасні частини, здійснена підготовка льотного й технічного персоналу й створена відповідна наземна інфраструктура [11, 12].

Імпорт високотехнологічних систем ОВСТ, як правило, держави намагаються здійснити на основі міждержавних угод [12]. Наприклад, Індія та РФ 15 жовтня 2016 року за підсумками зустрічі в Гоа індійського прем'єра Н. Моді та президента Росії В. Путіна підписали угоди про постачання в Індію російської зенітної ракетної системи великої дальності С-400 «Триумф», експорт вертольотів Ка-226Т та налагодження його виробництва в Індії [13].

**Військово-технічні механізми.** Визначення оперативно-стратегічних вимог (ОСВ) до імпортованого в країну ОВСТ, як правило, здійснюється, виходячи зі стратегічних задач зміцнення обороноздатності держав та інших довгострокових планів розвитку ЗС й інших військових формувань. До цього процесу залучаються види або роди ЗС (ВПС, ВМС, СВ тощо) або інших військових формувань. Визначені потреби узагальнюються генеральними (головними) штабами з формуванням загальних перспективних планів закупівель ОВСТ та міністерствами оборони, включаючи потреби, що задовольняються за імпортом. Для отримання додаткової інформації МО та відповідні йому організації видів та родів ЗС можуть надсилати до компаній потенційних країн-експортерів запити з метою отримання інформації про характеристики ОВСТ, умови постачань тощо.

Узгодження ОСВ до імпортованих ОВСТ (щодо кількості, ТТХ тощо), що вимагають ЗС або інші формування, та їх включення в проекти довгострокових програм закупівель ОВСТ проходять декілька ітерацій, оскільки бюджетні ресурси на оборону (практично в усіх країнах) обмежені.

Підготовка до випробувань, випробування та проведення оцінок поданих на тендери зразків ОВСТ здійснюється спеціалізованими установами МО та ЗС країн-імпортерів систем ОВСТ. Як правило, заходи з транспортування ОВСТ на випробування на полігони країн-імпортерів, а також заходи з проведення випробувань фінансуються компаніями-експортерами ОВСТ.

**Економічні механізми.** Значення таких механізмів у сучасних умовах продовжує зростати, особливо при наявності кризових явищ в економіці та активній політики держав щодо розвитку ОП. Як показує практика, вартість програм імпорту систем ОВСТ суттєво залежить від багатьох факторів. До таких факторів можливо віднести кількість та технічні вимоги до ОВСТ, комплектації поставок, гарантій з боку експортера на системи ОВСТ, обсягів офсетних вимог тощо.

Для прикладу проаналізуємо проект закупівлі 126 середніх багатоцільових бойових літаків для ВПС Індії за програмою MMRCА. У ході тендера в 2007–2011 роках цей проект оцінювався в суму 10–10,5 млрд. дол. США. Станом на 2012 рік цей проект оцінювався приблизно в

12 млрд. дол. США. Однак у ході переговорів МО Індії з компанією Dassault Aviation, що отримала перемогу в тендері, щодо винищувача Rafale вартість програми MMRCА зросла спочатку до 15 млрд. дол. США, а потім у 2015 році збільшилась до 20–21 млрд. США. Це було обумовлено збільшенням вимог з боку Індії до умов постачання літаків, обсягів передачі технологій, гарантій з якості виробництва літаків на території Індії, гарантій з підтримки експлуатації літаків протягом 40 років тощо. Групу з ведення переговорів та підготовки контракту в рамках тендера за програмою MMRCА очолював з індійської сторони помічник міністра оборони Індії із закупівлі авіаційної техніки.

Тому важливо для імпортерів чітко визначити до начала тендерних процедур воєнно-економічні показники імпорту необхідних систем ОВСТ. Наприклад, МО Бельгії ще в червні 2014 року почало підготовку процедури закупівлі винищувачів нового покоління, призначених для заміни літаків F-16АМ, що планується зняти з озброєння, починаючи з 2023 року. ВПС Бельгії підготувало, а МО 4 червня 2014 року направило «запит про інформацію» про можливість поставки нових літаків п'яти іноземним урядовим агентствам, що реалізують програми поставки винищувачів разом з компаніями-виробниками [10]. Після одержання запиту про інформацію компанії та уряди різних країн приступили до реалізації програми просування своїх літаків і формування офсетних програм у рамках проекту закупівлі літаків нового покоління для ВПС Бельгії. Наприклад, у пропозиції, поданій компанією BAE Systems від імені консорціуму Eurofighter з просування винищувачів Турхооп, у тому числі надається інформація про ряд можливих соціальних і технологічних переваг у результаті співробітництва бельгійських підприємств з компаніями-виробниками літака, включаючи Airbus Group, BAE Systems і «Леонардо». Згідно з інформацією компанії BAE Systems, у рамках майбутніх офсетних програм виробники ведуть переговори більш ніж з 100 бельгійськими фірмами про співробітництво в сфері оборони, космосу та авіабудування, а також виробництва ТВП.

**Методологічний підхід до оцінки ефективності державної політики при імпорті озброєнь.** Політичні, військово-технічні та економічні механізми з реалізації державної політики при імпорті озброєнь у сфері військово-технічного співробітництва між державами при наявності глобальних економічних, фінансових та політичних криз по-різному впливають на кінцевий результат – ефективність державної політики при імпорті озброєнь. Кожна з вищезазначених груп механізмів є комплексною величиною, на які також впливає багато різних факторів.

Враховуючи комплексний характер механізмів впливу на ефективність державної політики та результати роботи [4, с. 103–113], для оцінки цього впливу можливо запропонувати методологічний підхід до оцінки ефективності державної політики при імпорті озброєнь, який базується на основі експертних оцінок.

Як інтегральний критерій оцінки ефективності державної політики при імпорті озброєнь  $E$ , що враховує

політичні, військово-технічні та економічні механізми (фактори), визначимо вагову суму за сукупністю комплексних механізмів за формулою

$$E = \sum_{i=1}^m l_i E_i, \quad (1)$$

де  $l_i$  – вагові коефіцієнти комплексних механізмів,  $E_i$  – значення  $i$ -го комплексного механізму складової ефективності державної політики при імпорті озброєнь,  $m$  – кількість комплексних механізмів складових ефективності державної політики при імпорті озброєнь. У даному випадку  $m=3$ . Вагові коефіцієнти комплексних механізмів складових державної політики при імпорті озброєння визначаються на експертному рівні. Сума вагових коефіцієнтів комплексних механізмів  $l_i$  дорівнює одиниці.

У свою чергу, значення  $i$ -го комплексного механізму (політичного, військово-технічного та економічного) складової ефективності державної політики при імпорті озброєнь  $E_i$  може визначатися групою факторів. У такому випадку  $E_i$  визначаються за формулою

$$E_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} K_{ij}, \quad (2)$$

де  $k_{ij}$  – вагові коефіцієнти  $j$ -го фактора комплексного  $i$ -го механізму,  $K_{ij}$  – значення  $j$ -го фактора комплексного  $i$ -го механізму,  $n$  – кількість факторів комплексного  $i$ -го механізму. Вагові коефіцієнти комплексних факторів визначаються на експертному рівні. Сума вагових коефіцієнтів факторів кожного комплексного  $i$ -го механізму має дорівнювати одиниці. При наявності групи експертів значення факторів комплексних механізмів знаходиться як середнє значення.

Для експертного оцінювання більш детально проаналізуємо складові політичних, військово-технічних та економічних механізмів. Найбільш важливими складовими політичних механізмів при оцінці реалізації державної політики при імпорті озброєнь у сфері військово-технічного співробітництва між державами є:

політична довіра держави-імпортера до держави-експортера озброєнь у сферах безпеки та оборони на довгострокову перспективу;

рівень політичних контактів керівництва держави-імпортера з керівництвом держави-експортера озброєнь;

політична підтримка реальних проектів з імпорту озброєнь;

можливість на політичному рівні держави за рахунок імпорту ОБСТ вирішувати комплексні проблеми зміцнення обороноздатності держави, забезпечення розвитку оборонної промисловості та економіки держави в цілому.

Найбільш важливими складовими військово-технічних механізмів при оцінці реалізації державної політики при імпорті озброєнь у сфері військово-технічного співробітництва між державами є:

ступінь задоволення вимог замовника ОСБТ, що придбається, за технічним рівнем, а також вимог за обсягом поставлених перед ОСБТ задач і умовам бойового застосування у визначеному регіоні та ін.;

організація випробувань представлених на тендери зразків ОСБТ;

визначення сумісності імпортних ОСБТ з наявною системою озброєнь;

оцінка можливості експлуатації імпортних ОБСТ протягом життєвого циклу.

Найбільш важливими складовими економічних механізмів при оцінці реалізації державної політики при імпорті озброєнь у сфері військово-технічного співробітництва між державами є:

вартість проекту придбання потрібного для ЗС парку іноземного ОБТ;

вартість підтримки в боєздатному стані всього придбаного парку іноземного ОБТ протягом його життєвого циклу;

наявність, привабливість та вартість офсетних договорів щодо імпорту ТОП;

структура офсетних договорів (інвестиції в окремі галузі економіки держави, у тому числі і в ОПК; придбання інноваційних технологій, ліцензій та ін.);

вартість створення додаткової інфраструктури для обслуговування іноземних ОБТ;

вартість перенавчання фахівців на нові іноземні ОБТ;

залучення вітчизняних підприємств до створення ОБТ на умовах кооперації;

ступінь оновлення технологічної бази ОПК і запобігання її технологічному відставанню від провідних країн світу;

створення нових робочих місць, поліпшення матеріального становища працівників ОПК та ін.

В остаточному вигляді шкала оцінки ефективності державної політики при імпорті озброєнь з використанням складових політичних, військово-технічних та економічних механізмів, формул (1) та (2) буде визначатися таким чином (табл. 1.).

Таблиця 1

Ефективність державної політики при імпорті озброєнь	Значення показника Е
Дуже велика	$E \geq 0.8$
Велика	$0.8 > E > 0.6$
Недостатньо велика	$0.6 > E > 0.4$
Мала	$0.2 < E \leq 0.4$
Дуже мала	$E \leq 0.2$

**Характеристика можливостей України із застосуванням комплексних механізмів з реалізації проектів імпорту високотехнологічних ОБСТ.** Українська ОП не виробляє багато видів високотехнологічних систем ОБСТ. Тому об'єктивно Україна повинна імпортувати такі системи. Це обумовлює необхідність на основі світового досвіду будувати власну українську систему політичних, військово-технічних та економічних механізмів імпорту ОБСТ. Важливим аспектом такої системи повинна бути не тільки комплексність, а й довгостроковість та виваженість планування майбутніх

заходів з імпорту на основі застосування методів ефективних витрат ресурсів. Наприклад, прийняття політичного рішення щодо імпорту визначеної системи ОВСТ повинно гарантувати в майбутньому оплату поставленої іноземною компанією системи. Для нових імпортованих систем ОВСТ також повинна готуватись внутрішня військова інфраструктура для їх експлуатації, сервізного обслуговування та ремонту. Поряд з основним контрактом на імпорт систем ОВСТ в інтересах МО та ЗС України повинні бути опрацьовані механізми підготовки офсетних угод та умови їх виконання в інтересах інших відомств, наприклад, ДК «Укроборонпром», Мінекономрозвитку або приватних компаній ОП.

Результати аналізу світового досвіду з організації тендерних процедур закупівлі необхідних систем ОВСТ, вибір переможців, проведення переговорів щодо укладання міждержавних угод та контрактів, підготовка офсетних програм та укладання офсетних угод в рамках основних угод на імпорт необхідних систем ОВСТ, як правило, покладаються на структури МО із закупівлі ОВСТ. Наприклад, у Фінляндії такими питаннями займається Департамент матеріального забезпечення ЗС МО, у Франції – генеральна дирекція з озброєння (Direction Générale de l'Armement, DGA) МО, у Республіці Корея – Агентство програм оборонних закупівель (DAPA) МО, в Японії – Агентство з матеріально-технічного забезпечення МО, в Туреччині – Підсекретаріат (управління) ОП (Savunma Sanayii Mustesarligi, SSM) МО, в Естонії – Центр оборонних інвестицій (ECDI) МО Естонії, у Німеччині – Федеральне відомство з озброєння, інформаційних технологій і експлуатації ЗС (нім. – Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr; BAAINBw) тощо.

### Висновки

1. При здійсненні імпорту високотехнологічних систем ОВСТ у країнах-імпортерах формуються комплексні системи забезпечення імпорту, що охоплюють політичні, військово-технічні та економічні механізми.

2. Комплекс політичних механізмів, у залежності від країни, здійснює оцінку та прийняття воєнно-політичних рішень щодо необхідності імпорту високотехнологічних систем ОВСТ у державах-імпортерах. На політичному рівні визначаються цілі та завдання імпорту необхідних систем ОВСТ, приймаються рішення щодо фінансування програм імпорту. Такий комплекс механізмів охоплює рівні як урядів, так і парламентів країн. Остаточні рішення щодо імпорту затверджуються у формах довгострокових стратегічних програм розвитку ЗС або програм з реалізації окремих проєктів імпорту ОВСТ.

3. Військово-технічні механізми імпорту ОВСТ у державах-імпортерах функціонують на рівні МО, генеральних (головних) штабів, видів або родів ЗС (ВПС, ВМС, СВ тощо) та інших військових формувань. Визначення ОСВ до ОВСТ, необхідного для імпорту в країну, як правило, здійснюється, виходячи зі стратегічних задач зміцнення обороноздатності держав та довгострокових планів розвитку ЗС та інших військових формувань,

з урахуванням політичних рішень та можливостей держави з фінансування імпорту.

4. Спостерігається світова тенденція ускладнення дії економічних механізмів імпорту ОВСТ у державах-імпортерах. Як показує світовий досвід, вони функціонують на рівні МО з підключенням багатьох відомств держави для ведення переговорів та укладання угод і контрактів. Вартість програм імпорту систем ОВСТ суттєво залежить не тільки від кількості, технічних вимог та комплектації поставок ОВСТ, а й від багатьох інших факторів, що знаходяться поза межами компетенції МО. Це можуть бути обсяги передачі технологій на виробництво імпортованих ОВСТ або їх комплектуючих, обсягів гарантій підтримки експлуатації імпортованої ОВСТ з боку експортера, офсетних вимог, створення спільних підприємства з виробництва ОВСТ тощо.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Стратегічне управління військово-технічним співробітництвом в інтересах забезпечення воєнної безпеки України : моногр. / [В. М. Бегма та ін.] ; за заг. ред. І. С. Руснака. К. : ІПНБ, НАОУ, 2005. 228 с.
2. Військово-технічне співробітництво: шляхи удосконалення : моногр. / В. О. Смірнов, В. М. Бегма, О. М. Рябець, В. В. Томчук ; за заг. ред. В. О. Смірнова. К. : ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2010. 216 с.
3. Бегма В. М., Мокляк С. П., Свергунов О. О., Толочний Ю. В. Офсетна політика держав в умовах глобалізації. Оцінки та прогнози. К. : НІСД, 2011. 352 с.
4. Теорія озброєння. Науково-технічні проблеми та завдання : моногр. Т. 2. Військово-технічне співробітництво в системі забезпечення воєнної безпеки держави / [І. Б. Чепков, В. В. Зубарев, В. О. Смірнов, О. О. Свергунов та ін.]. К. : ВД Дмитра Бурого, 2015. 404 с.
5. Чепков І. Б., Зубарев В. В., Свергунов О. О. Глобальні тенденції розвитку офсетної політики при експорті/імпорті озброєнь // Озброєння та військова техніка. 2016. № 3 (11). С. 3–7.
6. В Египет прибула головная НАПЛ класса «Тип-209/1400». ЦАМТО. 21.04.2017. URL: <http://www.armstrade.org/includes/periodics/main-news/2017/0421/093740634/detail.shtml>.
7. Решение по закупке истребителей F-35B «Лайтнинг-2» для ВВС Тайваня может быть принято в июле. ЦАМТО. 25.04.2017. URL: <http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2017/0425/131540698/detail.shtml>.
8. Мясников В. Австралия строит подводный флот. НВО. 02.02.2015. URL: [http://nvo.ng.ru/armament/2015-02-06/4\\_australia.html](http://nvo.ng.ru/armament/2015-02-06/4_australia.html).
9. Россия начала производство зенитных систем С-400 для Китая. Lenta.ru. 14.02.2017. URL: <https://lenta.ru/news/2017/02/14/c400/>.
10. Минобороны Бельгии объявило тендер на закупку новых истребителей. ЦАМТО. 20.03.2017. URL:

- <http://www.armstrade.org/includes/periodics/main-news/2017/0320/090940058/detail.shtml>.
11. Минобороны Болгарии завершило оценку предложений на поставку новых истребителей. ЦАМТО. 26.04.2017. URL: <http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2017/0426/101540718/detail.shtml>.
  12. Болгария выбрала истребители JAS-39 Gripen. Центр анализа стратегий и технологий. 27.04.2017. URL: <http://bmpd.livejournal.com/>.
  13. Россия и Индия начали реализовывать проект производства Ка-226Т. ЦАМТО. 28.01.2016. URL: <http://www.armstrade.org/includes/periodics/news/2016/0128/154533282/detail.shtml>.

**Рецензент С. В. Лапицкий**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральный науково-дослідний інститут озброєння  
та військової техніки Збройних Сил України)

УДК 623.438

**С. П. БІСИК**, кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник,

**О. В. ЧЕРНОЗУБЕНКО**

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

**В. Р. СХАБИЦЬКИЙ**

(615 військове представництво МОУ, м. Київ),

**О. А. СЛИВІНСЬКИЙ**,

кандидат технічних наук, доцент

(КПІ ім. І. Сікорського, м. Київ),

**В. А. ХАНЮКОВ**

(військова частина А2192, смт Городок)

## Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини

Надані результати числового моделювання пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенної перешкоди. Визначено стійкість, збіжність та похибку рішення з використанням числової моделі порівняно з відомими експериментальними даними.

Представлены результаты численного моделирования пробития ударниками с разной формой головной части гомогенной мишени. Определены стойкость, сходимость и погрешность решения с использованием численной модели в сравнении с известными экспериментальными данными.

Проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей потребує проведення досліджень з підвищення захищеності бойових броньованих машин (ББМ) від ураження різними вогневыми засобами. Встановлені експертним опитуванням загрози для ББМ (рис. 1), визначені відповідно до них основні вимоги до ББМ та важливість їх виконання в конструкції ББМ показують, що поряд з необхідністю забезпечення захищеності від протитанкових мін та саморобних пристроїв досить актуальним є підвищення балістичного захисту від куль стрілецької зброї [1–3].

На сьогодні методи дослідження складних високошвидкісних фізичних процесів (таких як удар, вибух та інші імпульсні навантаження) суттєво вдосконалилися в порівнянні з минулим століттям. Це пов'язано, насамперед, зі створенням нових елементів випробувальних установок, що дають можливість більш точно отримати експериментальні дані (наприклад, швидкості польоту ударників у момент зіткнення з перешкодою та після її пробиття, швидкості розльоту утворених внаслідок вибуху осколків, кумулятивних струменів та ін.). Проте такі експерименти вимагають використання складного обладнання та залучення значних коштів. Сучасний розвиток обчислювальної техніки в поєднанні з числовими методами дозволяє проводити дослідження швидкопротікаючих процесів, частково або повністю замінюючи проведення натурного експерименту. Крім того, застосування числового моделювання дозволяє значно скоротити фінансові витрати на проведення експериментальних досліджень. Поєднання натурних експериментів з числовим моделюванням дає змогу більш швидко та точно отримувати інформацію про поведінку об'єктів при складних навантаженнях.

Тому створення числових моделей процесів, що досліджуються, перевірка їх адекватності, стійкості, збіжності та оцінка точності рішення є актуальним науковим завданням при дослідженні шляхів забезпечення захищеності ББМ від ураження кулями стрілецької зброї [4].

**Метою** статті є розробка числової моделі пробиття гомогенної перешкоди ударником з різною формою головної частини, визначення стійкості, збіжності та похибки рішення порівняно з відомими експериментальними даними.

Апробація числової моделі проведена з використанням результатів натурного експерименту [5]. При цих дослідженнях використано три форми головної частини ударника: циліндрична, півсферична та конічна. Вибір таких форм пояснюється можливістю дослідження різних механізмів пробиття перешкоди.

Підхід до побудови скінченно-елементної моделі та методологія ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей матеріалів ґрунтується на даних робіт [6, 7].

При проведенні натурного експерименту як перешкода використовувалася жорстко закріплена кругла пластина діаметром 500 мм та товщиною 12 мм виготовлена зі сталі WELDOX460E з характеристиками, наведеними в табл. 1 [8].

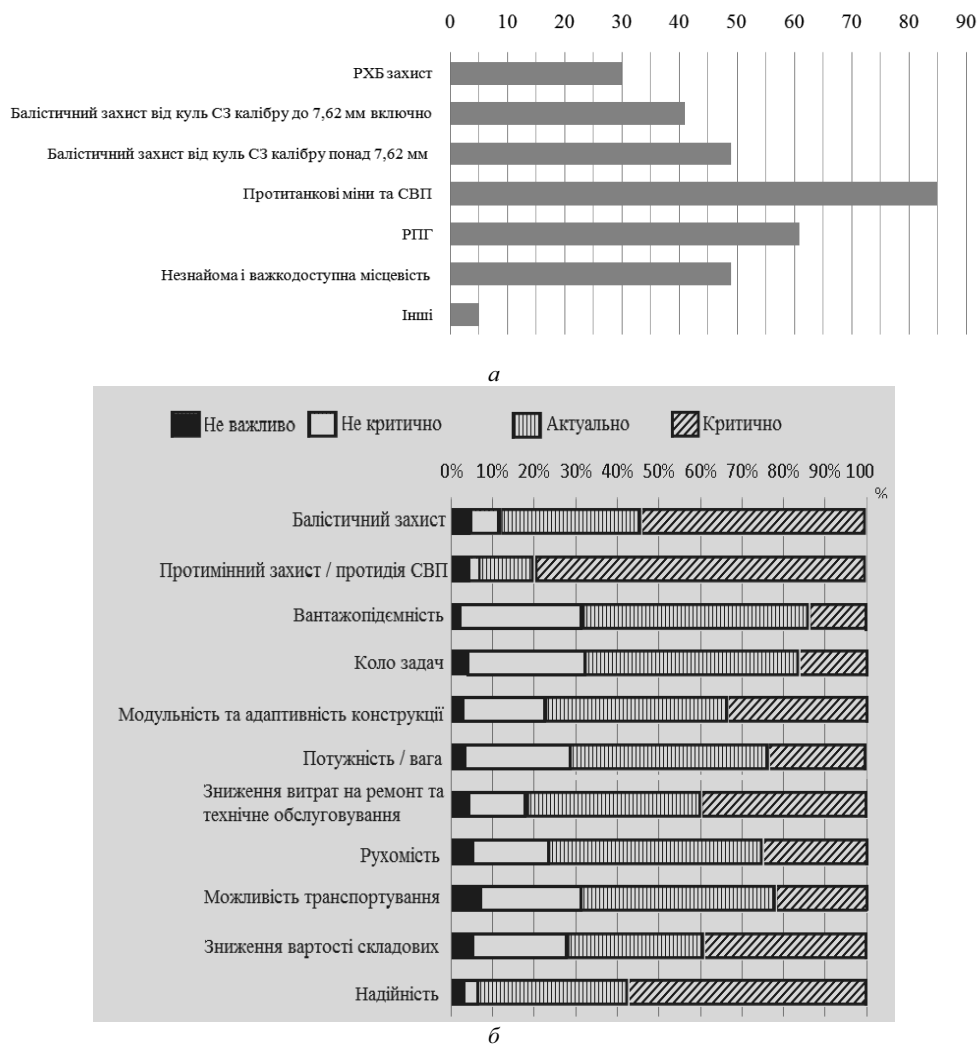


Рис. 1. Загрози для ББМ, що визначені експертним опитуванням (а) та основні вимоги до ББМ й актуальність їх виконання в конструкції ББМ за думкою експертів до 2023 року (б)

Таблиця 1. Характеристики сталі WELDOX 460E (перешкода)

E, ГПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	A, МПа	B, МПа	
200	0,33	7850	490	807	
$C_p(J/kgK)$	$\alpha$	$\beta(1/K)$	$T_m(K)$	$T_0(K)$	
452	0,9	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1800	293	
n	$\nu_0, \nu_0^*(1/s)$	C	$D_c$	$p_d$	
0,73	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0144	0,30	0	
m	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
0,94	0,0705	1,732	-0,54	-0,015	0

Таблиця 2. Константи матеріалу для сталі ARNE TOOL STEEL (ударник)

E, ГПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_0$ , МПа	$E_t$ , ГПа	$\epsilon_f$ , %
204	0,33	7850	1900	15	2,15

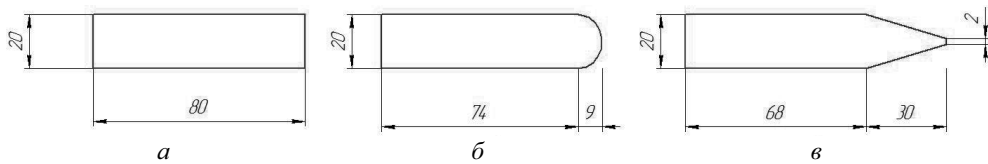


Рис. 2. Геометричні розміри ударників з різними типами головної частини:  
а – циліндрична; б – півсферична; в – конічна

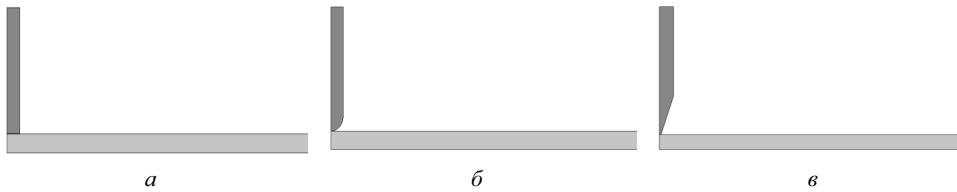


Рис. 3. Розрахункові схеми моделювання пробиття ударником перешкоди:  
а – для варіанта з циліндричною головною частиною; б – для варіанта з півсферичною головною частиною; в – для варіанта з конічною головною частиною

Ударники мали форму циліндрів діаметром 20 мм та масою 0,197 кг. Інші геометричні розміри ударників підбиралися з умови незмінності їх маси (рис. 1). Ударники виготовлені зі сталі ARNE TOOL STEEL з характеристиками наведеними в табл. 2 [8].

Скінченно-елементні моделі досліджуваних об'єктів (ударник та перешкода) були створені за допомогою програми «FEMAP with NX NASTRAN» [9]. Для скорочення часу обчислень було використано вісесиметричну постановку задачі. Розрахункові схеми показані на рис. 3.

Скінченно-елементна модель утворена чотиривузловими плоскими елементами. Для зменшення часу розрахунку розміри елементів були збільшені ближче до закріпленої частини пластини.

Для дослідження поведінки пластини при пробитті ударником з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін використовувалися модель пластичності матеріалу Джонсона–Кука (Johnson–Cook) [10]:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^p) \left( 1 + c \ln \dot{\epsilon}^* \right) (1 - T^{*m}),$$

де  $A, B, C, n$  і  $m$  – константи матеріалу;  $\bar{\epsilon}^p$  – ефективна пластична деформація;  $\dot{\epsilon}^* = \bar{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0$  – швидкість ефективної пластичної деформації для  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_{\text{room}}) / (T_{\text{melt}} - T_{\text{room}})$  – гомологічна температура.

Деформація при руйнуванні задавалась залежністю

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - T^*],$$

де  $\sigma^* = p / \sigma_{\text{eff}}$  – відношення тиску до ефективних напружень.

Руйнування відбувається за умови, якщо параметр руйнування  $D = \sum \bar{\epsilon}^p / \epsilon^f$  досягає значення 1.

Залежність тиску та об'єму пластини описувалась з використанням рівняння стану Мі–Грюнайзена (Mi–Gruneisen) [10]:

$$p = \left[ \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - a/2\mu^2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} \right] + (\gamma_0 + a\mu)E,$$

де  $C$  – кутовий коефіцієнт кривої  $v_s - v_p$ ;  $S_1, S_2, S_3$  – коефіцієнти нахилу кривої  $v_s - v_p$ ;  $\gamma_0$  – постійна Грюнайзена;  $a$  – корекція об'єму першого порядку  $\gamma_0$ ;  $\mu = \frac{p}{\rho_0} - 1$ .

Оскільки основним об'єктом досліджень була саме пластина, то для скорочення часу обчислень ударник

було описано, використовуючи модель Купера–Саймондса (Cowper–Symonds) [10]:

$$\sigma_r = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p), \quad E_p = E_{\text{ig}} E / (E - E_{\text{ig}}),$$

$$\epsilon_{\text{eff}}^p = \int_0^t \left( \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt,$$

де  $p$  і  $C$  – параметри швидкості деформацій;  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформацій;  $\sigma_0$  і  $\sigma_T$  – статична та динамічна границі текучості;  $E$  – модуль пружності;  $E_{\text{ig}}$  – модуль зміцнення.

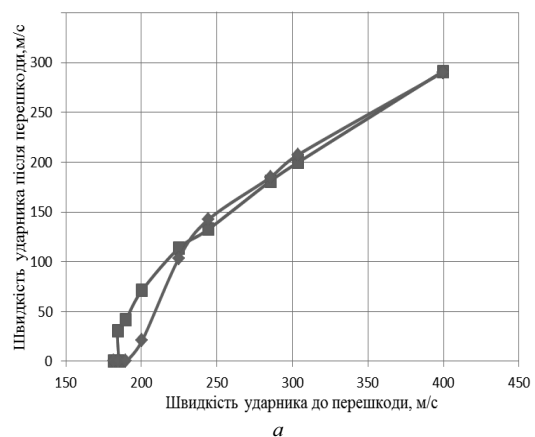
Швидкість пластичних деформацій визначається як різниця між швидкостями повних і пружних деформацій  $\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e$ .

За результатами проведеного числового моделювання отримані значення швидкості ударників після пробиття ними перешкоди. Ці значення порівнянні зі значеннями, що отримані при натурному експерименті [5] (рис. 4). Крім того, порівняно значення швидкості пробки для циліндричної та півсферичної головної частин ударника (рис. 5). Отримані значення показують, що відносна похибка числового розрахунку в порівнянні з натурними експериментами не перевищує 10%. Отримана точність характерна для граничних режимів пробиття.

Якісне порівняння процесу пробиття ударником перешкоди при натурному експерименті та при числовому розрахунку показані на рис. 6.

Типовий процес пробиття ударником перешкоди зображений на рис. 7–9.

Типові залежності зміни швидкості ударника та пробки, що утворюється при пробитті, показані на рис. 10. Значення швидкості пробки взяті для центрального вузла скінченно-елементної моделі.



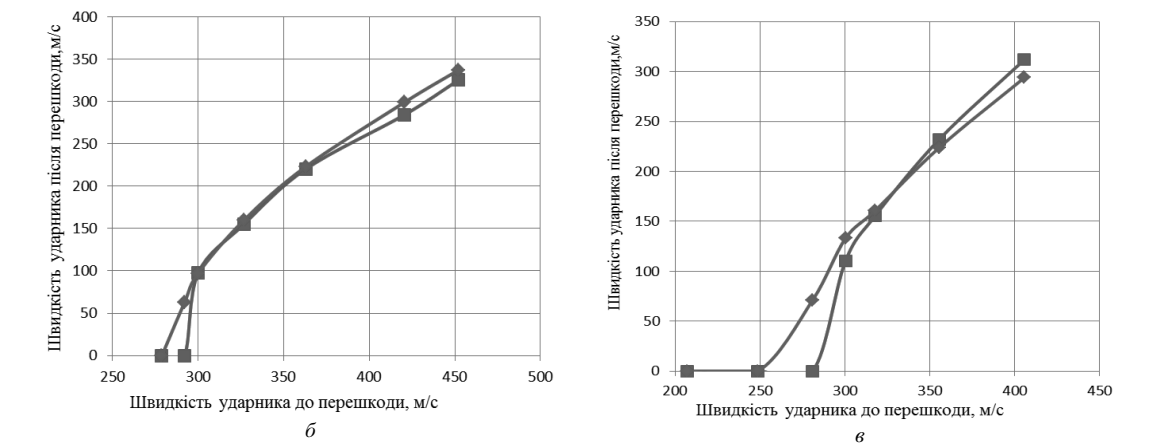


Рис. 4. Значення швидкості ударника після пробиття перешкоди:  
■ – натурний експеримент, ◆ – числовий розрахунок,  
а – циліндрична форма ударника, б – півсферична форма головної частини ударника, в – конічна форма головної частини ударника

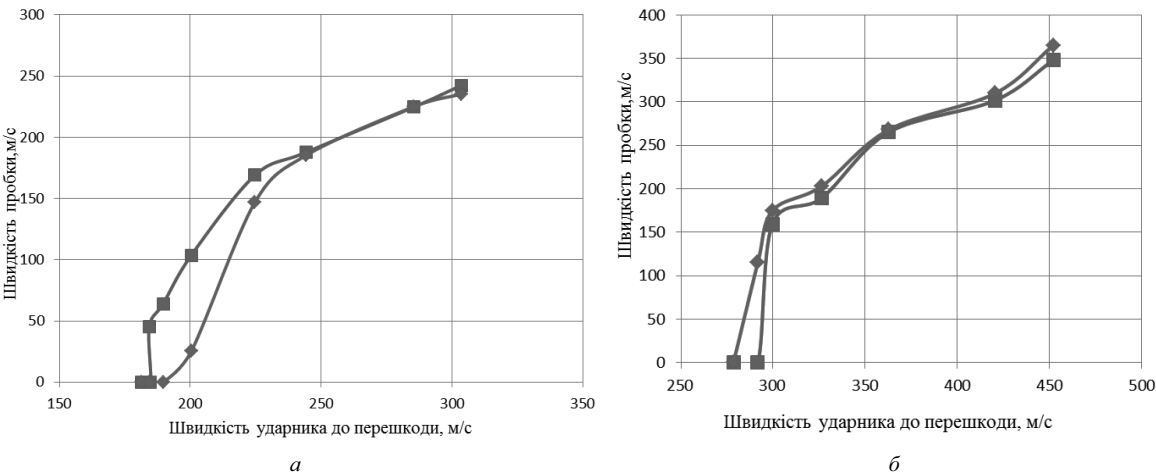


Рис. 5. Значення швидкості пробки після пробиття ударником перешкоди (позначення як на рис. 4)

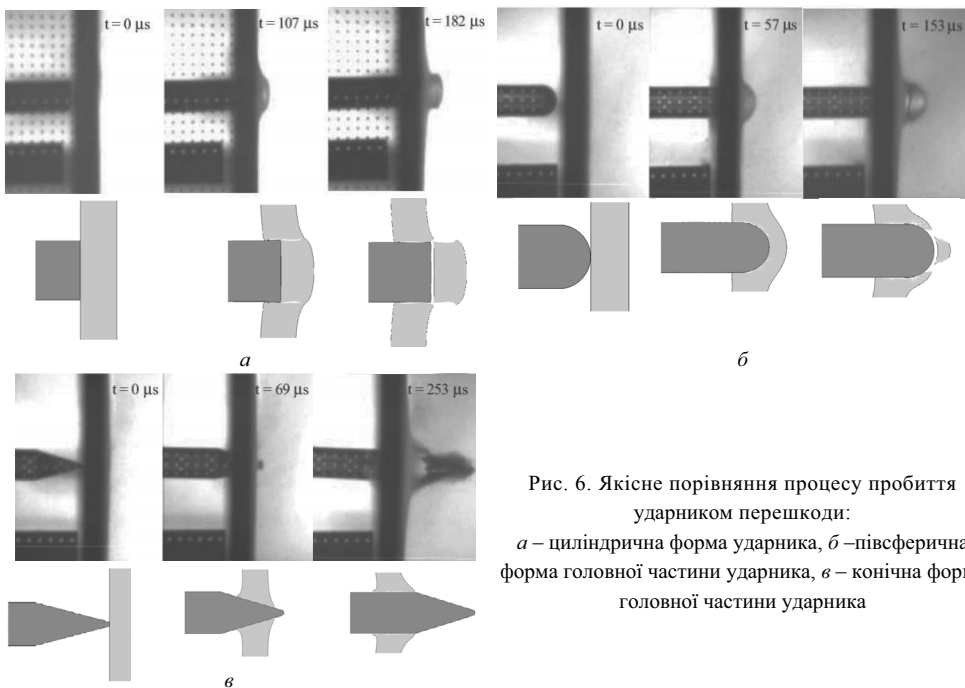


Рис. 6. Якісне порівняння процесу пробиття ударником перешкоди:  
а – циліндрична форма ударника, б – півсферична форма головної частини ударника, в – конічна форма головної частини ударника



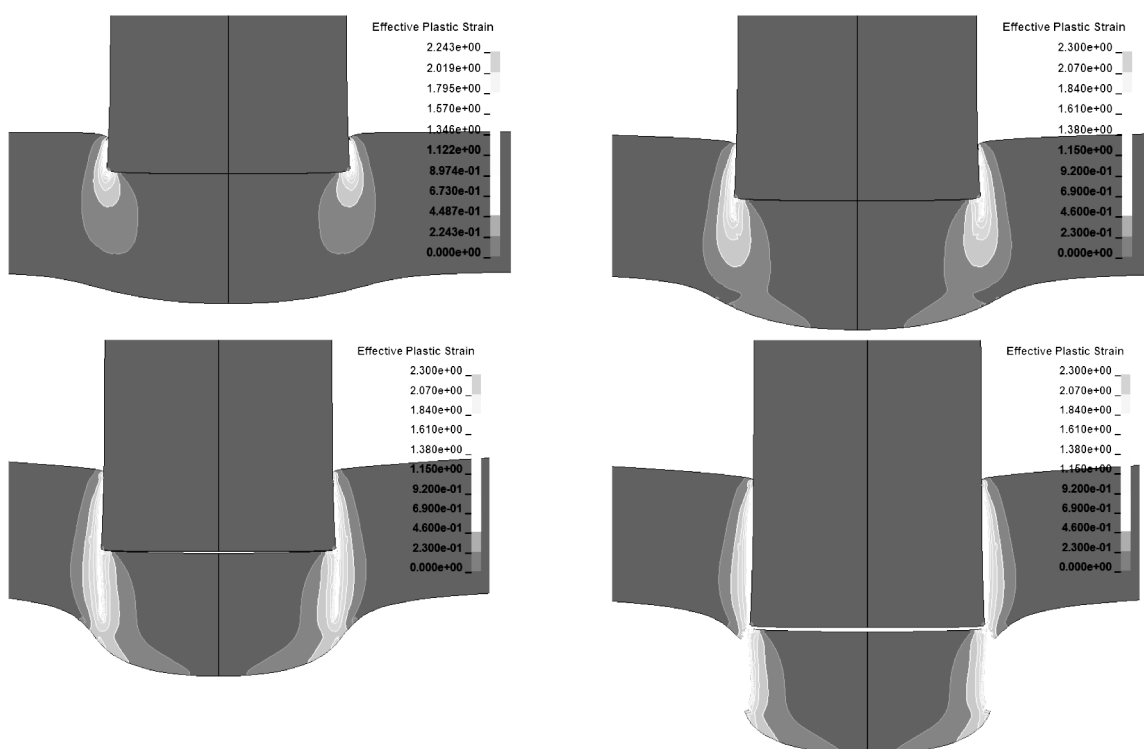


Рис. 7. Типовий процес пробиття циліндричним ударником перешкоди та поля пластичних деформацій

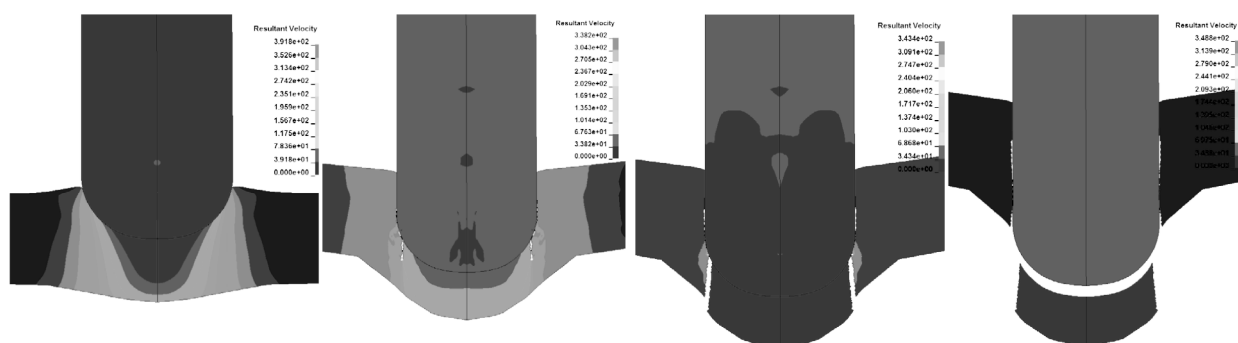


Рис. 8. Типовий процес пробиття півсферичним ударником перешкоди та поля результуючої швидкості

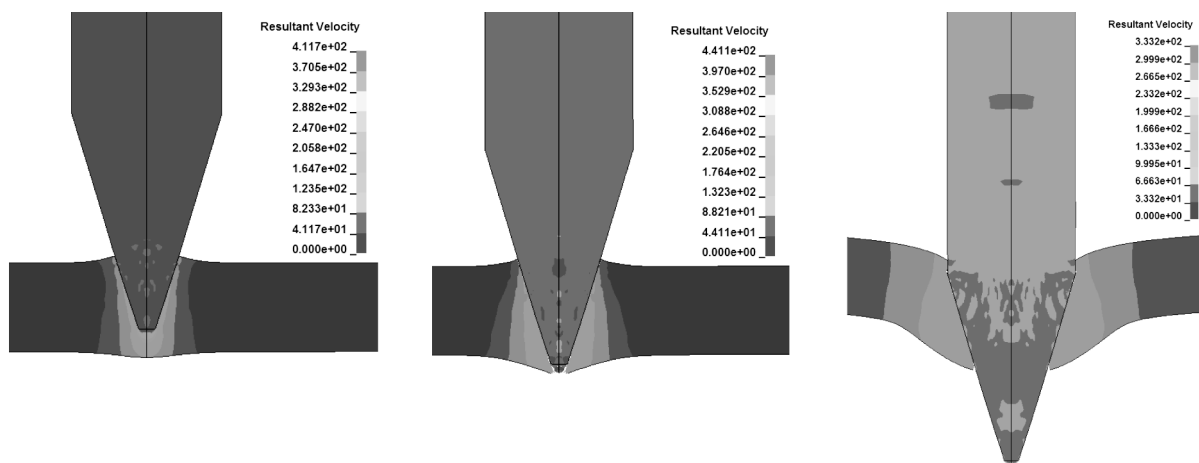


Рис. 9. Типовий процес пробиття конічним ударником перешкоди та поля результуючої швидкості

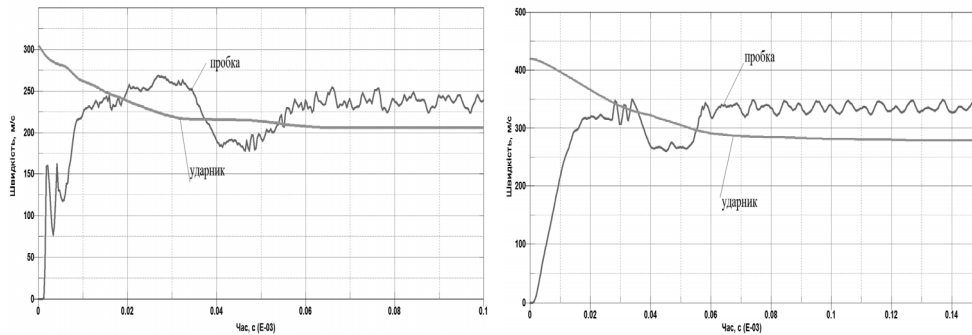


Рис. 10. Типові залежності зміни швидкості ударника та пробки:

а – циліндрична форма ударника, б – півсферична форма головної частини ударника

За результатами проведених досліджень можна зробити такі **висновки**:

розроблена числова модель для дослідження пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенних перешкод. Порівняння отриманих числових значень з даними експериментальних досліджень показують, що відносна похибка вирішення задачі пробиття ударником з різними геометричними формами головної частини гомогенної перешкоди знаходиться в діапазоні 2–10%;

за результатами оцінки збіжності чисельного рішення отримані значення розмірів скінченних елементів, що дозволяють отримувати адекватне рішення в діапазоні швидкості удару 180–450 м/с;

розроблена числова модель може бути використана для оцінки захисних елементів у конструкції бойових броньованих машин та проведення їх параметричного синтезу за обраним критерієм ефективності.

У подальшому доцільні дослідження взаємодії ударника з перешкодою на швидкостях взаємодії до 1500 м/с.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Summary of global armoured vehicle market report 2013. URL: <http://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/articles/summary-of-global-armoured-vehicle-market-report-2>].
- Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» / С. П. Бісик, І. Б. Чепков, М. І. Васьківський [та ін.] // Озброєння та військова техніка : щоквартальний наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОБТ ЗСУ. 2016. № 1 (9). С. 26–31.
- Майстренко А. Л., Куш В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Стримати кулю. Захист бойових броньованих машин від ураження кулями калібру 12,7 мм та 14,5 мм // Defense express. 2017. Вып. № 3–4. С. 58–60.
- Майстренко А. Л., Куш В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7 мм кулями Б-32 // Озброєння та військова техніка : щоквартальний наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОБТ ЗСУ. 2017. № 1 (13). С. 18–23.
- Borvik T., Langseth M., Hopperstad O. S., Malo K. A. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. P. I. Experimental study // International Journal of Impact Engineering 27 (2002). 19–35.
- Криворучко Д. В., Залога В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : моногр. / под общ. ред. В. А. Залого. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
- Криворучко Д. В., Залога В. О., Корбач В. Г. Основи 3D-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів. Суми : Вид-во СумДУ, 2010. 209 с.
- Borvik T., Hopperstad O. S., Berstad T., Langseth M. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. P. II. Numerical simulations // International Journal of Impact Engineering 27 (2002). 37–64.
- Рудаков К. Н. FEMAP 10.2.0 Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. К. : КПИ, 2011. 317 с.
- Hollquist J. O. LS-DYNA Theory manual. March 2006.

**Рецензент М. І. Васьківський**, д-р техн. наук, проф. (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)

УДК 623.438

**І. Б. ЧЕПКОВ**, доктор технічних наук, професор,  
**М. І. ВАСЬКІВСЬКИЙ**, доктор технічних наук,  
професор,

**С. П. БІСИК**, кандидат технічних наук, старший  
науковий співробітник,

**С. І. ШЕРЕМЕТОВ**

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

**В. Г. КОРБАЧ**, кандидат технічних наук, доцент  
(ДП «Державне Київське конструкторське бюро  
«Луч», м. Київ)

## Дослідження підриву мін у каналі ствола 120-мм міномета

Надані результати числового моделювання підриву міни в каналі ствола міномета та їх експериментальна якісна перевірка. Метою статті є дослідження наслідків та характеру підриву мін в каналі ствола міномета для використання при проведенні експертизи з визначення причини розриву ствола міномета. Проведені дослідження виявили характерні особливості руйнування ствола міномета при підриві в ньому однієї або двох мін. Виявлений характер руйнування ствола міномета при числовому моделюванні та при натурному підриві дозволяє за зоною руйнування встановити кількість мін, які вибухнули в стволі, що може бути використано при проведенні експертизи з визначення причини розриву ствола міномета.

Представлены результаты численного моделирования подрыва мины в канале ствола миномета и их экспериментальная качественная проверка. Целью статьи является исследование последствий и характера подрыва мин в канале ствола миномета для использования при проведении экспертизы по определению причины разрыва ствола миномета. Проведенные исследования выявили характерные особенности разрушения ствола миномета при подрыве в нем одной или двух мин. Установленный характер разрушения ствола миномета при числовом моделировании и при натурном подрыве позволяет по зоне разрушения установить количество мин, которые взорвались в стволе, что может быть использовано при проведении экспертизы по определению причины разрыва ствола миномета.

Під час проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей та при підготовці особового складу трапляються випадки загибелі обслуги міномета внаслідок підриву міни в каналі ствола міномета. Супутнім негативним фактором цього є те, що вітчизняні засоби масової інформації роблять упереджені висновки щодо міцності ствола міномета і впливу дефектів конструкції на так звані «вибухи» міномета [1, 2]. Ці публікації засоби масової інформації Російської Федерації активно використовують як пропагандистські матеріали [3, 4]. У подібних публікаціях причиною загибелі особового складу, на думку їх авторів, є «вибух» міномета, що, безумовно, зовсім не відповідає дійсності. Конструктивні недоліки міномета не можуть спричинити руйнування ствола міномета при стрільбі. Єдиною причиною загибелі особового складу є підрив міни в каналі ствола, який має два варіанти: підрив однієї міни внаслідок нештатного спрацювання підривника та підрив двох мін внаслідок порушення заходів безпеки з подальшим подвійним заряджанням.

Підтвердженням цього є застосування математичних підходів до оцінки і прогнозування наслідків підриву міни в каналі ствола міномета з їх наступною перевіркою натурним експериментом.

**Метою** статті є дослідження наслідків та характеру підриву мін у каналі ствола міномета з використанням методів числового моделювання та їх експериментальна перевірка для використання при проведенні експертизи з визначення причини розриву ствола міномета.

Для проведення математичного моделювання підриву міни в стволі міномета використано спеціалізовану програму для високо нелінійного динамічного аналізу на основі методу скінченних елементів. Метод має необхідну збіжність з результатами натурних випробувань та використовується для моделювання дії вибухових навантажень. Оцінка точності та збіжності задач подібного роду наведена в роботах [5–7]. Підхід до побудови скінченно-елементної моделі та методологія ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей матеріалів ґрунтується на даних робіт [8, 9].

Для проведення моделювання застосовано вісесиметричну постановку з використанням оболонкових елементів Хьюса–Лю (Hughes–Liu). Розв’язання задачі проведено з використанням багатокomпонентного лагранже-ейлерівського підходу.

Для вибухової речовини (ВР) задана рівнянням стану продуктів детонації ВР Джонса–Вілкінса–Лі (Jones–Wilkins–Lee (JWL))

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) \exp\{-R_1 V\} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) \exp\{-R_2 V\} + \frac{\omega}{V} \bar{E},$$

де  $V = \rho_0 / \rho = v / v_0$  – відносний питомий об’єм;  $A, B, C, R_1, R_2, \omega$  – емпіричні константи;  $\bar{E}$  – внутрішня енергія на одиницю об’єму. У стані Жуґе

$$\bar{E}_H = \bar{E}_0 + \frac{p_H}{2} (1 - V_H)$$

де  $\bar{E}_0$  – нормалізована величина, що включає енергію хімічних зв’язків і визначається з термохімічного

Таблиця

Параметри Чепмена-Жуге (Chapman-Jouget)					Коефіцієнти рівняння стану продуктів детонації у формі JWL					
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	P, ГПа	D, м/с	$E_0$ , ГДж/м <sup>3</sup>	$\Gamma$	A, ГПа	B, ГПа	$C$ , м <sup>3</sup> /кг	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	$\omega$
1630	21,0	6930	7,00	2,727	371,20	3,231	1,045	4,15	0,95	0,30

експерименту або за даними термодинамічного розрахунку.

Характеристики вибухової речовини, що використовувались при проведенні математичного моделювання, наведенні в таблиці, де  $\rho$  – початкова густина ВР,  $P$  – тиск Чепмена-Жуге,  $E_0$  – внутрішня енергія,  $\Gamma$  – показник адиабати продуктів детонації в точці Чепмена-Жуге.

При проведенні математичного моделювання прийнята розрахункова схема, що наведена на рис. 1. У першому випадку розрахований підрив однієї міни в каналі ствола міномета. У другому випадку в розрахунковій схемі задано дві міни, що вибухають у каналі ствола міномета. У місцях розташування мін скінченно-елементна сітка виконання з меншими розмірами.

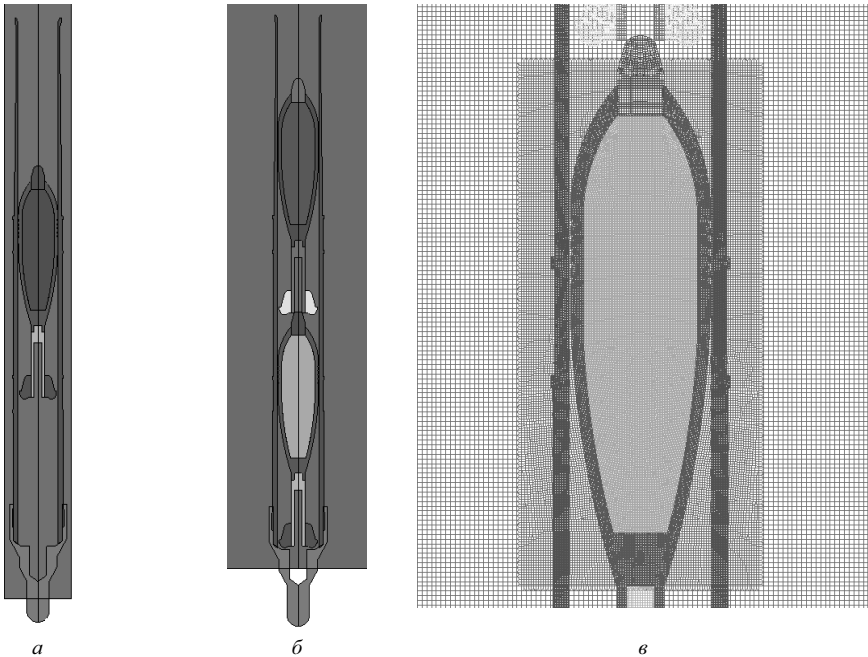


Рис. 1. Розрахункова схема процесу, що досліджувався:  
а – підрив однієї міни в каналі ствола; б – підрив двох мін у каналі ствола, в – згущення скінченно-елементної сітки в районі розташування міни

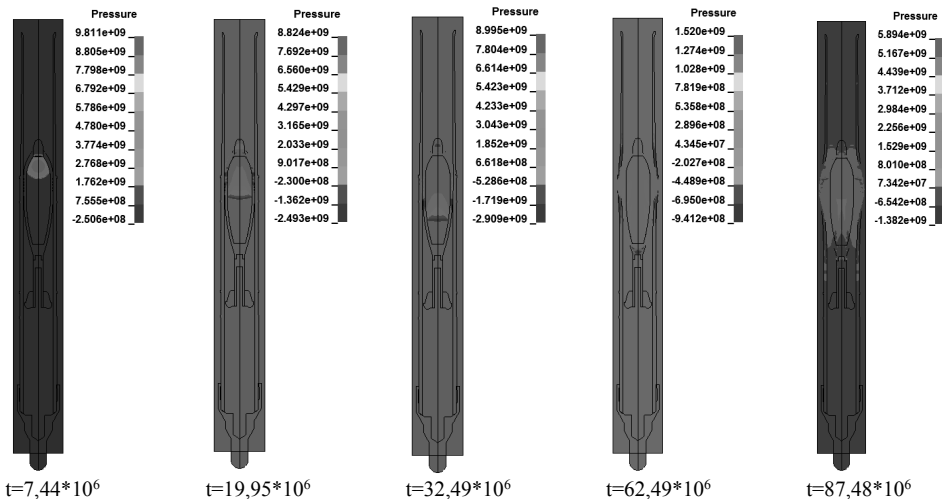


Рис. 2. Зони зміни тиску при підриві однієї міни в каналі ствола міномета

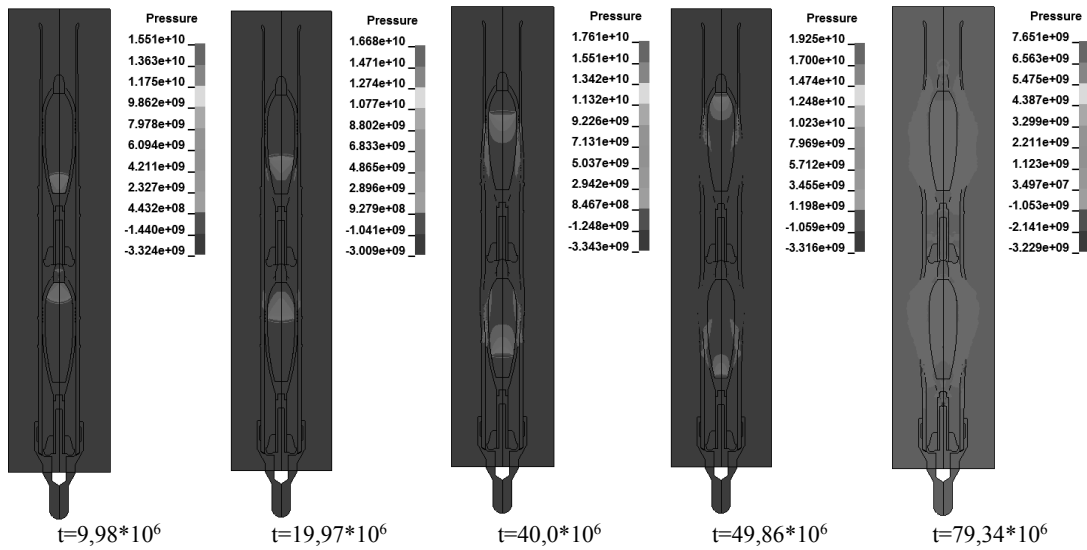


Рис. 3. Зони зміни тиску при підстрілі двох мін у каналі ствола міномета

При проведенні дослідження прийнято, що корпус міни виготовлений зі сталістого чугуна. Фізико-механічні властивості чугуна взяті з роботи [10].

При підстрілі двох мін в каналі ствола міномета прийнято точку детонації для міни, що знаходиться знизу, у районі підстрільника, для міни, що знаходиться зверху, – у нижній частині міни. При підстрілі однієї міни в каналі ствола точка детонації – у районі підстрільника.

Отримані при числовому моделюванні зони зміни тиску показані на рис. 2, 3: зони поширення продуктів детонації – на рис. 4, 5.

Виконані експериментальні дослідження підстрілу ствола міномета та проведено порівняння характеру руйнування ствола міномета після розриву з результатами числового моделювання. Отримані результати вказують на те, що руйнування ствола міномета має певні характерні ознаки та відбувається в області розташування міни, а за розмірами наближається до розміру корпусу міни. Основні розміри міни наведені на рис. 6.

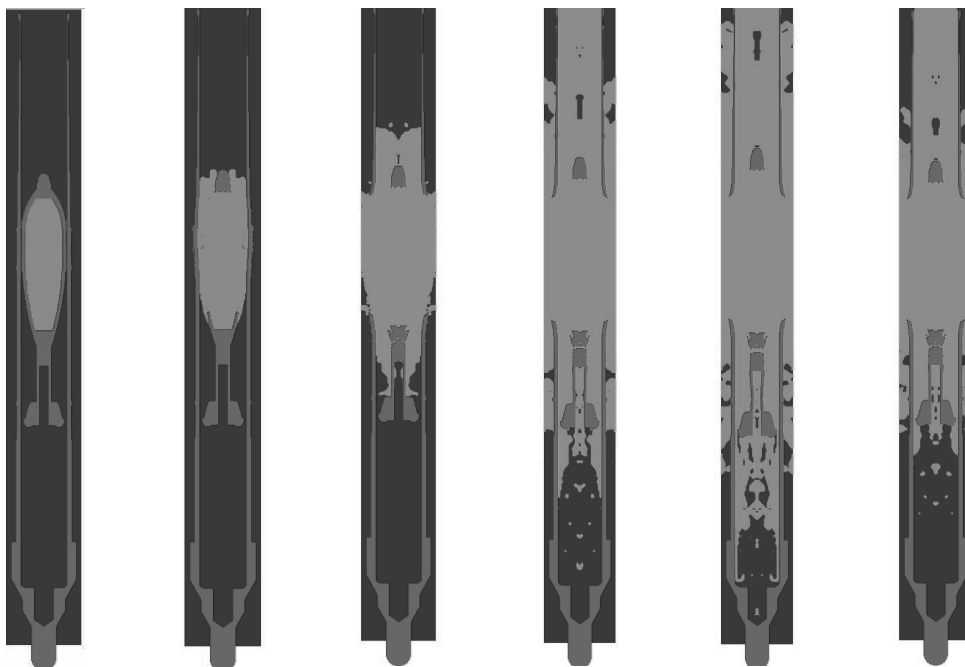


Рис. 4. Розширення продуктів детонації при підстрілі однієї міни в каналі ствола міномета

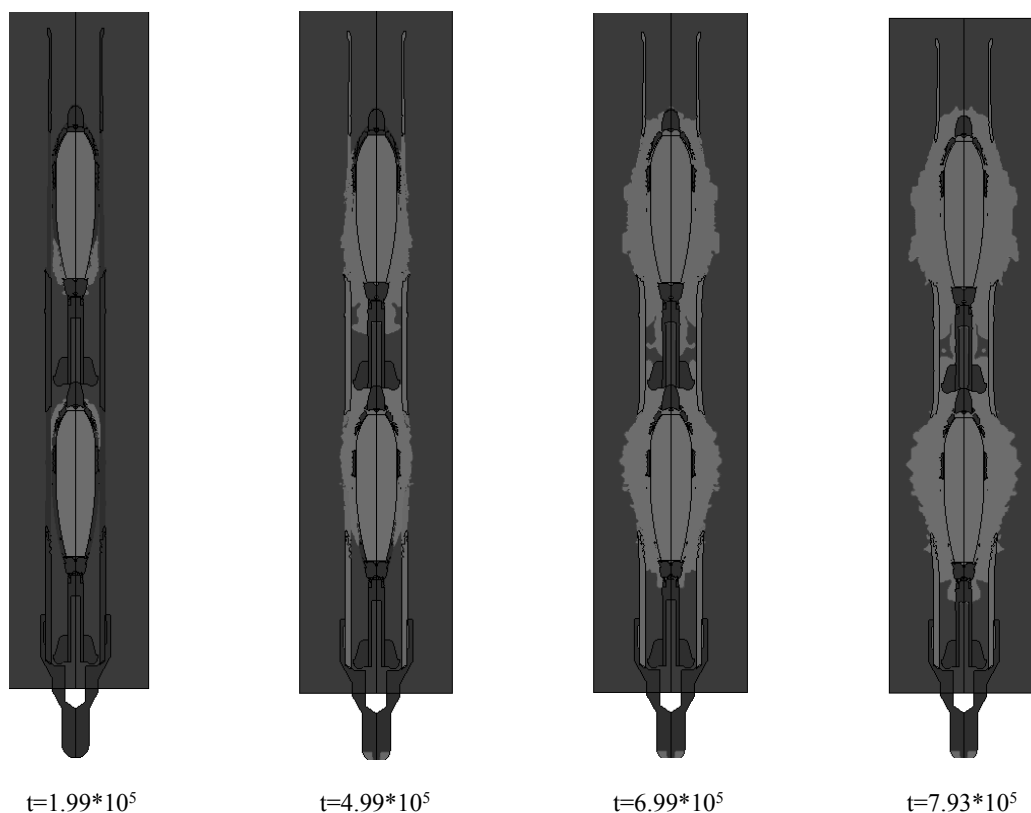


Рис. 5. Розширення продуктів детонації при піддриві двох мін у каналі ствола міномета

Таким чином, отримані зони руйнування каналу ствола міномета складають:

- при піддриві однієї міни в каналі ствола міномета (рис. 7):

при числовому моделюванні – 400–420 мм,  
при натурному експерименті – до 530 мм;

- при піддриві двох мін у каналі ствола міномета (рис. 8):

залишки казенної частини при числовому моделюванні мають довжину близько 345 мм (при натурному піддриві – близько 380 мм);

незруйнована частина ствольної частини при числовому моделюванні – близько 300 мм (при натурному піддриві – приблизно 300 мм);

зруйнована центральна частина ствола у розрахунках становить близько 925 мм (при натурному піддриві – близько 800–850 мм).

При числовому моделюванні піддриву двох мін у каналі ствола міномета спостерігаються залишки частини ствола між двома мінами. Характер руйнування частини ствола між двома мінами при проведенні натурного піддриву показаний на рис. 9. Вціліла частина ствола, що залишилась при проведенні чисового моделювання, спричинена особливостями двовимірної постановки числової моделі.

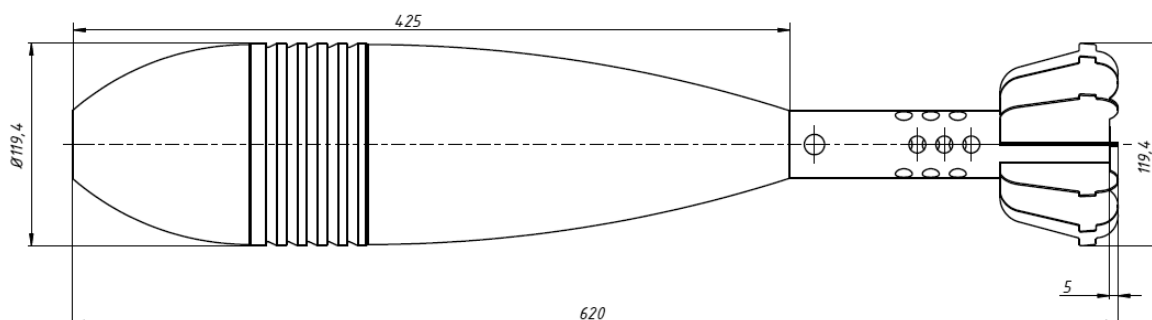


Рис. 6. Основні розміри міни

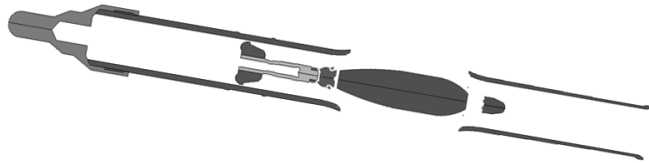


Рис. 7. Характер руйнування ствола міномета при натурному експерименті та при проведенні числового моделювання при підриві однієї міни в каналі ствола

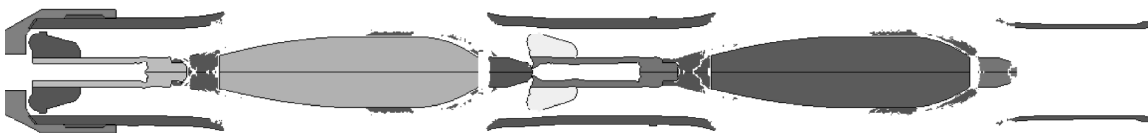
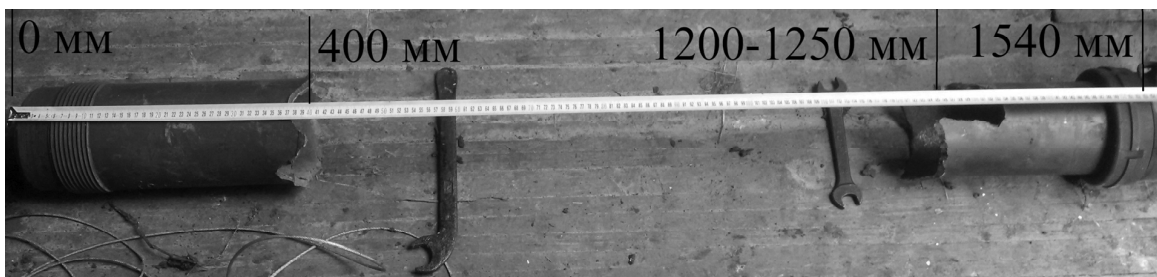


Рис. 8. Характер руйнування ствола міномета при натурному експерименті та при проведенні числового моделювання при підриві двох мін у каналі ствола



Рис. 9. Характер руйнування центральної частини ствола міномета при натурному підриві двох мін в каналі ствола

За результатами проведених досліджень можна зробити такі **висновки**:

розроблена числова модель підриву мін у каналі ствола міномета має досить високу якісну збіжність з результатами проведених натурних експериментів;

проведені дослідження руйнування ствола міномета при підриві однієї та двох мін у каналі ствола міномета показують характерні особливості його руйнування;

характер руйнування ствола міномета при числовому моделюванні та при натурному підриві дозволяє за зоною руйнування встановити кількість мін, які вибухнули в стволі. Встановлення кількості мін, що вибухнули в стволі, у свою чергу, дозволяє висунути найбільш імовірну причину підриву міни при польоті в каналі ствола. Так, при підриві однієї міни в каналі ствола найбільш імовірною причиною може бути нештатне спрацювання підричника. При підриві двох мін в каналі ствола найбільш імовірною причиною може бути порушення заходів безпеки обслугою внаслідок подвійного заряджання міномета;

зважаючи на близькі механічні властивості ствола вітчизняного міномета «Молот» та аналогічного радянського можна припустити, що характер та причини руйнування стволів мінометів будуть аналогічними.

Таким чином, основним напрямом запобігання підриву мін у каналі ствола міномета є підвищення заходів безпеки як за рахунок навченості особового складу, так і, можливо, за рахунок використання нових технічних рішень, наприклад систем акустичного контролю пострілу з наступним наданням дозволу на стрільбу.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Люди гинуть, бо «Молот» не доведений до кінця – начальник озброєння Сухопутних військ про новий український міномет. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/28461727.html>.
2. В Минобороны впервые признали гибель военных из-за проблем с минометами «Молот». URL: <https://www.obozrevatel.com/crime/73902-v-minoboronyi-vpervyie-priznali-gibel-voennyih-iz-za-problem-s-minometami-molot.htm>.

3. Миномет «Молот». URL: <https://topwar.ru>.
4. Минобороны Украины признало, что миномет «Молот» убивает бойцов ВСУ. URL: <https://regnum.ru/news/polit/2271007.html>.
5. Бісик С. П., Голуб В. А., Корбач В. Г. Числове вирішення задачі ударно-хвильового навантаження пластини // Військово-технічний збірник / Академія Сухопутних військ. 2011. № 2 (5). С. 3–6.
6. Бісик С. П., Чепков І. Б., Васьківський М. І., Давидовський Л. С., Корбач В. Г., Висоцький О. М., Захаревич Д. М. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» // Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОБТ ЗСУ. 2016. № 1 (9). С. 26–31.
7. Бісик С. П. Дослідження конструкції захисного протимінного екрана // Військово-технічний збірник / АСВ. 2015. № 12. С. 110–117.
8. Криворучко Д. В., Залога В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : моногр. / под общ. ред. В. А. Залоги. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
9. Криворучко Д. В., Залога В. А., Корбач В. Г. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів. Суми : Вид-во СумДУ, 2010. 209 с.
10. Парфенов В. Д. Структура и механические свойства чугунов. URL: <http://library.miit.ru/methodics/04022015/03-%2040839.pdf>.

**Рецензент С. В. Лапицький**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)



УДК 621.396.67

**О. О. ЖУРАВЛЬОВ,**

кандидат технічних наук, доцент,

**О. В. КОЛОМІЙЦЕВ,** кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник,

**С. В. ГЕРАСИМОВ,** доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник,

**Б. О. ЧУМАК,** кандидат технічних наук, доцент  
(Харківський національний університет  
Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків)

## Метод оцінки значення похибки коефіцієнта сили лобового опору снаряда за результатами зовнішньотраєкторних вимірювань

Розроблений метод оцінки похибки розрахунку значень коефіцієнта сили лобового опору снаряда, отриманих з використанням результатів зовнішньотраєкторних вимірювань. Швидкість і прискорення обчислені за методом кубічних поліномів віртуальних систем координат. Проведений порівняльний аналіз оцінок величин інструментальних похибок, що отримані за результатами зовнішньотраєкторних вимірювань снаряда різними станціями.

Ключові слова: інструментальна похибка, коефіцієнт сили лобового опору, станція зовнішньотраєкторних вимірювань.

Разработан метод оценки погрешности расчета значений коэффициента силы лобового сопротивления снаряда, полученных с использованием результатов внешних траекторных измерений. При этом скорость и ускорение вычислены по методу кубических полиномов виртуальных систем координат. Проведен сравнительный анализ оценок величин инструментальных погрешностей, которые получены по результатам внешних траекторных измерений снаряда разными станциями.

Ключевые слова: инструментальная погрешность, коэффициент силы лобового сопротивления, станция внешних траекторных измерений.

Для балістичних розрахунків параметрів траєкторій нових артилерійських снарядів, реактивних снарядів реактивних систем залпового вогню, ракет тактичного (оперативно-тактичного) призначення (далі – снарядів) і складання їх таблиць стрільби точність визначення значень коефіцієнта сили лобового опору  $c_x(M)$  повинна характеризуватися похибкою не більше 0,2...0,3% в усьому діапазоні швидкості польоту снаряда [1].

Таким чином, на етапі льотних випробувань снарядів оцінка можливості використання станцій зовнішньотраєкторних вимірювань (ЗТВ), що формують початкові дані для обчислень значень функції  $c_x(M)$  з вказаною допустимою похибкою, є актуальною науковою задачею.

Залежність  $c_x(M)$  на етапі ескізного проектування отримують на основі аналітичних і чисельних методів з відносною похибкою до 10% [2, 3]. Також оцінки значень  $c_x(M)$  підтверджують на основі продувки моделей снарядів у дозвукових і надзвукових аеродинамічних трубах при деяких фіксованих значеннях чисел Маха з відносною похибкою до одиниць відсотків [3]. Проводяться експериментальні дослідження моделей снарядів на спеціально обладнаних балістичних трасах, що дозволяє досягти відносної похибки до 0,2%, але тільки для вузького діапазону швидкості [1].

Метою статті є розроблення методу обчислення похибки розрахунків значень коефіцієнта сили лобового опору снаряда з використанням прискорення та швидкості центра мас, розрахованих методом кубічних поліномів віртуальних систем координат за результатами ЗТВ.

Введені такі допущення:

Земля – сфера, що не обертається, з центральним полем тяжіння;

атмосфера – стандартна, без вітру;

модель артилерійського снаряда – матеріальна точка, що рухається у вертикальній площині стартової системи координат під дією сил лобового опору та земного тяжіння та значення висоти траєкторії снаряда значно менше, ніж значення радіуса Землі.

Оцінка величини  $c_x(M)$  проводиться за формулою, отриманою перетворенням диференціального рівняння, що описує тангенціальне прискорення центра мас в швидкісній системі координат [1]:

$$c_x(M) \approx -f_c (\dot{v} + g_0 \sin \theta), \quad (1)$$

$$\text{де } f_c = c_0 \frac{m}{d^2} \frac{\exp(k_p h)}{a_{36}^2 M^2}, \quad M = \frac{v}{a_{36}}, \quad c_0 = \frac{8}{\rho_0 \pi} = 2,08,$$

$$k_p = 1,41 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}, \quad R_z = 6371110 \text{ м}, \quad g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2,$$

$m$ ,  $d$  – маса і діаметр снаряда відповідно;  $v$ ,  $\theta$  – модуль та кут нахилу вектора швидкості до стартового горизонту відповідно;  $R_z$  – радіус сферичної Землі;  $g_0$  – прискорення вільного падіння у поверхні Землі;  $\rho_0$  – густина повітря на поверхні Землі;  $a_{36}$  – швидкість звуку;  $M$  – число Маха.

Значення  $a_{36}$  може бути розраховано за формулою [2]

$$a_{36} = 20,046796 \sqrt{T_v} \text{ [м/с]}, \quad (2)$$

де  $T_v = T(1 + 0,377e/p)$  [K];  $T = 273,15 + t^\circ\text{C}$  [K];  $T_v$  – віртуальна температура повітря;  $e$  – парціальний тиск водяних парів;  $p$  – атмосферний тиск на висоті  $h$ ;  $t^\circ\text{C}$  – температура повітря.

У формулі (1) значення  $\dot{v}$ ,  $M$ ,  $\theta$ ,  $h$  обчислюються за результатами обробки результатів ЗТВ.

Визначення величини похибки розрахунків значень  $c_x(M)$  на основі результатів ЗТВ параметрів траєкторії снаряда різними комплексами (системами) ЗТВ з різними показниками точності вимірювань, зв'язок між середньоквадратичним відхиленням (СКВ)  $\sigma_{c_x}$  та похибками вимірювань, що характеризуються СКВ  $\sigma_{\dot{v}}$ ,  $\sigma_{\alpha}$ ,  $\sigma_{\beta}$  (де  $D$  – похила дальність до снаряда,  $\alpha$  – азимут,  $\beta$  – кут місця), пропонується встановити за три етапи.

На першому етапі встановлюється зв'язок між  $\sigma_{c_x}$  та  $\sigma_{\dot{v}}$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_d$ .

На другому етапі встановимо зв'язок між СКВ  $\sigma_{\dot{v}}$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_{\theta}$  та СКВ  $\sigma_s$  розрахунку значення  $s$  довжини дуги траєкторії снаряда та СКВ  $\sigma_t$  вимірювання часу  $t$ .

На третьому етапі встановимо зв'язок між СКВ  $\sigma_s$  та СКВ  $\sigma_{\dot{v}}$ ,  $\sigma_{\alpha}$ ,  $\sigma_{\beta}$ .

Перший етап. При гіпотезі, що СКВ  $\sigma_{\dot{v}}$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_d$  розрахунку значень  $\dot{v}$ ,  $M$ ,  $\theta$ ,  $h$ ,  $m$ ,  $d$ , які входять до формули (1), статистично незалежні та розподілені за нормальним законом, а систематичні похибки рівні нулю,  $\sigma_{c_x}^2$  визначається так [5]:

$$\sigma_{c_x}^2 \approx \left(\frac{\partial c_x}{\partial \dot{v}}\right)^2 \sigma_{\dot{v}}^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial M}\right)^2 \sigma_M^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial \theta}\right)^2 \sigma_{\theta}^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial m}\right)^2 \sigma_m^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2. \quad (3)$$

При цьому часткові похідні, що входять до (3), розраховуються за формулами

$$\frac{\partial c_x}{\partial \dot{v}} = -f_c; \quad \frac{\partial c_x}{\partial M} = \frac{2}{M} f_c f_A; \quad f_A = (\dot{v} + g_0 \sin \theta); \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_x}{\partial \theta} = -f_c g_0 \cos \theta; \quad \frac{\partial c_x}{\partial h} = -k_p f_c f_A; \quad (5)$$

$$\frac{\partial c_x}{\partial m} = -\frac{1}{m} f_c f_A; \quad \frac{\partial c_x}{\partial d} = \frac{2}{d} f_c f_A. \quad (6)$$

Підставляючи (4) – (6) послідовно в (3), отримаємо формулу для оцінки значення СКВ  $\sigma_{c_x}^2$ :

$$\sigma_{c_x}^2 \approx f_c^2 \left\{ \sigma_{\dot{v}}^2 + f_A^2 \left[ C_h \sigma_h^2 + \frac{1}{m^2} \sigma_m^2 + \frac{4}{d^2} \sigma_d^2 + \frac{4}{M^2} \sigma_M^2 \right] + (g_0 \cos \theta)^2 \sigma_{\theta}^2 \right\}; \quad C_h = 2 \times 10^{-8}. \quad (7)$$

У формулі (7) значення  $C_h \sigma_h^2 < 1$ , тому ним можливо знехтувати.

При підготовці до льотних випробувань значення  $m$  і  $d$  снаряда можливо визначити з високою точністю, значення  $C_m \sigma_m^2 < 1$ ,  $C_d \sigma_d^2 < 1$ , тому ними також можливо знехтувати.

Після спрощень (7) формулу для оцінки значення СКВ  $\sigma_{c_x}$  можна записати так:

$$\sigma_{c_x} \approx f_c \sqrt{\sigma_{\dot{v}}^2 + F_M \sigma_M^2 + F_{\theta} \sigma_{\theta}^2}, \quad (8)$$

$$\text{де } F_M = \left[ \frac{2}{M} (\dot{v} + g_0 \sin \theta) \right]^2; \quad F_{\theta} = (g_0 \cos \theta)^2.$$

Із аналізу виразу (8) зробимо висновок, що основний вплив на величину СКВ  $\sigma_{c_x}$  мають СКВ  $\sigma_{\dot{v}}$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_{\theta}$ , які залежать від інструментальних похибок станцій ЗТВ.

Другий етап.

1. Значення  $M_i$  числа Маха в  $i$ -й вузловій точці розраховується за формулою [4]

$$M_i = \frac{-s_{i-3} + 5s_{i-2} - 13s_{i-1} + 13s_{i+1} - 5s_{i+2} + s_{i+3}}{12 \Delta t a_{36}}. \quad (9)$$

Припускаючи, що похибки розрахунку значень  $s_i$ ,  $\Delta t$  статистично незалежні та розподілені за нормальним законом, а систематичні похибки дорівнюють нулю, тоді

$$\sigma_M^2 = \left(\frac{\partial M_i}{\partial s_{i-3}}\right)^2 \sigma_{s_{i-3}}^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial s_{i-2}}\right)^2 \sigma_{s_{i-2}}^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial s_{i-1}}\right)^2 \sigma_{s_{i-1}}^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial s_{i+1}}\right)^2 \sigma_{s_{i+1}}^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial s_{i+2}}\right)^2 \sigma_{s_{i+2}}^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial s_{i+3}}\right)^2 \sigma_{s_{i+3}}^2 + \left(\frac{\partial M_i}{\partial t}\right)^2 \sigma_t^2. \quad (10)$$

Часткові похідні, що входять до (10), розраховуються за такими формулами:

$$\frac{\partial M_i}{\partial s_{i-3}} = -\frac{\partial M_i}{\partial s_{i+3}} = -\frac{1}{12 \Delta t a_{36}}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial s_{i-2}} = -\frac{\partial M_i}{\partial s_{i+2}} = \frac{5}{12 \Delta t a_{36}}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial s_{i-1}} = -\frac{\partial M_i}{\partial s_{i+1}} = -\frac{13}{12 \Delta t a_{36}},$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = -\frac{M_i}{\Delta t a_{36}}. \quad (13)$$

Підставляючи (11) – (13) в (10) та враховуючи, що  $\sigma_{s_{i-3}} \approx \sigma_{s_{i-2}} \approx \sigma_{s_{i-1}} \approx \sigma_{s_{i+1}} \approx \sigma_{s_{i+2}} \approx \sigma_{s_{i+3}} = \sigma_s$ , формулу для оцінки значення  $\sigma_M^2$  можливо записати так:

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{(\Delta t a_{36})^2} (5,42 \sigma_s^2 + [M_i \sigma_t]^2). \quad (14)$$

2. Значення  $\dot{v}_i$  модуля прискорення центра мас снаряда в  $i$ -й вузловій точці обчислюється за формулою [4]

$$\dot{v}_i = \frac{-s_{i-3} + 4s_{i-2} - 3s_{i-1} - 3s_{i+1} + 4s_{i+2} - s_{i+3}}{4 \Delta t^2}. \quad (15)$$

Припускаючи, що похибки розрахунку значень  $s_i$ ,  $\Delta t$  статистично незалежні та розподілені за нормальним законом та систематичні похибки дорівнюють нулю, справедливо записати

$$\begin{aligned} \sigma_{\dot{v}}^2 = & \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-3}} \right)^2 \sigma_{s_{i-3}}^2 + \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-2}} \right)^2 \times \\ & \times \sigma_{s_{i-2}}^2 + \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-1}} \right)^2 \sigma_{s_{i-1}}^2 + \\ & + \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i+1}} \right)^2 \sigma_{s_{i+1}}^2 + \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i+2}} \right)^2 \sigma_{s_{i+2}}^2 + \\ & + \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i+3}} \right)^2 \sigma_{s_{i+3}}^2 + \left( \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial t} \right)^2 \sigma_t^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Часткові похідні, що входять до (16), розраховуються за формулами

$$\frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-3}} = \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-3}} = -\frac{1}{4\Delta t^2}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-2}} = \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-2}} = \frac{1}{\Delta t^2}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-1}} = \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial s_{i-1}} = -\frac{3}{4\Delta t^2}; \quad \frac{\partial \dot{v}_i}{\partial t} = -2\frac{\dot{v}_i}{\Delta t}. \quad (19)$$

Підставляючи (17) – (19) в (16) формулу для оцінки значення  $\sigma_{\dot{v}}^2$  можна записати

$$\sigma_{\dot{v}}^2 = \frac{4}{\Delta t^2} \left( 1,625 \left[ \frac{\sigma_s}{\Delta t} \right]^2 + [\dot{v}_i \sigma_t]^2 \right). \quad (20)$$

3. Значення синуса кута нахилу вектора швидкості  $\sin \theta_i$ ,  $3 \leq i \leq I-3$ , в  $i$ -й вузловій точці розраховується за формулою [4]

$$\sin \theta_i = \frac{-y_{i-3} + 5y_{i-2} - 13y_{i-1} + 13y_{i+1} - 5y_{i+2} + y_{i+3}}{-s_{i-3} + 5s_{i-2} - 13s_{i-1} + 13s_{i+1} - 5s_{i+2} + s_{i+3}}. \quad (21)$$

Припускаючи, що похибки розрахунку значень  $s_i$ ,  $y_i$  статистично незалежні та розподілені за нормальним законом, а систематичні похибки дорівнюють нулю, отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta}^2 \approx & \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i-3}} \right)^2 \sigma_s^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i-2}} \right)^2 \sigma_s^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i-1}} \right)^2 \sigma_s^2 + \\ & + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i+1}} \right)^2 \sigma_s^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i+2}} \right)^2 \sigma_s^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i+3}} \right)^2 \sigma_s^2 + \\ & + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i-3}} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i-2}} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i-1}} \right)^2 \sigma_y^2 + \\ & + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i+1}} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i+2}} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i+3}} \right)^2 \sigma_y^2. \end{aligned} \quad (22)$$

Часткові похідні, що входять до (22), розраховуються за формулами

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i-3}} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i+3}} = -F_1; \quad (23)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i-2}} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i+2}} = 5F_1; \quad (24)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i-2}} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial y_{i+2}} = 5F_1; \quad (25)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i-3}} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i+3}} = -F_2; \quad (26)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i-2}} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i+2}} = -5F_2; \quad (27)$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i-1}} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial s_{i+1}} = 13F_2; \quad F_2 = F_1 \sin \theta_i; \quad (28)$$

$$F_1 = \frac{1}{(-s_{i-3} + 5s_{i-2} - 13s_{i-1} + 13s_{i+1} - 5s_{i+2} + s_{i+3}) \cos \theta_i}. \quad (29)$$

Підставляючи (23) – (29) в (22), формулу для оцінки значення  $\sigma_{\theta}^2$  запишемо так:

$$\sigma_{\theta}^2 \approx 390 F_1^2 (\sigma_y^2 + [\sigma_s \sin \theta_i]^2). \quad (30)$$

Третій етап.

1. Значення довжини траєкторії розраховується за формулою

$$s = \sum_{i=1}^I \Delta s_i, \quad (31)$$

$$\Delta s_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}.$$

Припускаючи, що похибки розрахунку значень  $q_i$ ,  $q := [x, y, z]$  статистично незалежні та розподілені за

нормальним законом, а систематичні похибки дорівнюють нулю, запишемо

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 \approx & \left( \frac{\partial s_i}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial x_{i-1}} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial y_i} \right)^2 \sigma_y^2 + \\ & + \left( \frac{\partial s_i}{\partial y_{i-1}} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial z_i} \right)^2 \sigma_z^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial z_{i-1}} \right)^2 \sigma_z^2. \end{aligned} \quad (32)$$

Часткові похідні, що входять до (32), розраховуються за формулами

$$\frac{\partial s_i}{\partial q_i} = -\frac{\partial s_i}{\partial q_{i-1}} = \frac{\Delta q_i}{s_i}, \quad \Delta q_i = q_i - q_{i-1}. \quad (33)$$

Підставляючи (33) в (32), формулу для оцінки значення  $\sigma_s^2$  отримаємо у виді

$$\sigma_s^2 \approx \frac{2}{\Delta s_i^2} [(\Delta x_i \sigma_{x_i})^2 + (\Delta y_i \sigma_{y_i})^2 + (\Delta z_i \sigma_{z_i})^2]. \quad (34)$$

2. При визначенні похибки геодезичної прив'язки системи координат вимірювального комплексу до стартової системи координат запишемо співвідношення

$$x = x_0 + x \cos \varphi - z \sin \varphi;$$

$$y = y_0 + y; \quad (35)$$

$$z = z_0 + x \sin \varphi + z \cos \varphi.$$

Припускаючи, що похибки вимірювань значень навігаційних параметрів у вимірювальному комплексі статистично незалежні і розподілені за нормальним законом, систематичні похибки дорівнюють нулю, маємо:

$$\sigma_s^2 \approx \left( \frac{\partial s_i}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial x_{i-1}} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial y_i} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial y_{i-1}} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial z_i} \right)^2 \sigma_z^2 + \left( \frac{\partial s_i}{\partial z_{i-1}} \right)^2 \sigma_z^2. \quad (36)$$

$$\sigma_y^2 = \left( \frac{\partial y}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \varphi_0} \right)^2 \sigma_{\varphi_0}^2; \quad (37)$$

$$\sigma_z^2 = \left( \frac{\partial z}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \varphi_0} \right)^2 \sigma_{\varphi_0}^2 + \left( \frac{\partial z}{\partial \varphi} \right)^2 \sigma_\varphi^2, \quad (38)$$

де часткові похідні (36) – (38) визначаються за відношеннями:

$$\frac{\partial x}{\partial \beta} = \cos \beta \cos \alpha \cos \varphi; \quad (39)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} = -\cos \beta \sin \alpha \cos \varphi; \quad \frac{\partial x}{\partial \varphi_0} = 1; \quad (40)$$

$$\frac{\partial x}{\partial z} = -\sin \varphi; \quad (41)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi} = -D \cos \beta \cos \alpha \sin \varphi - z \cos \varphi; \quad (42)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \beta} = -D \sin \beta \cos \alpha \cos \varphi; \quad (43)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \beta} = \sin \beta; \quad \frac{\partial y}{\partial \varphi_0} = 1; \quad \frac{\partial y}{\partial \alpha} = D \cos \beta; \quad (44)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \beta} = \cos \beta \cos \alpha \sin \varphi + \cos \beta \sin \alpha \cos \varphi; \quad (45)$$

$$\partial z / \partial z_0 = 1; \quad (46)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = D \cos \beta \cos \alpha \cos \varphi - D \cos \beta \sin \alpha \sin \varphi; \quad (47)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \alpha} = -D \cos \beta \sin \alpha \sin \varphi + D \cos \beta \cos \alpha \cos \varphi; \quad (48)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \beta} = -D \sin \beta \cos \alpha \sin \varphi - D \sin \beta \sin \alpha \cos \varphi. \quad (49)$$

Проведені чисельна оцінка значень  $c_x(M)$  за формулою (1),  $\sigma_{c_x}$  – за формулою (8) та моделювання резуль-

татів вимірювань параметрів траєкторії снаряда різними станціями ЗТВ.

Як приклад розглянуто моделювання польоту осколково-фугасного снаряда ОФ45 при стрільбі з гаубиці Г2А65 «Мста-Б» з далекобійним зарядом.

Параметри снаряда ОФ45: маса  $m = 43,56$  кг; калібр  $d = 152,4$  мм; початкова швидкість  $810$  м/с.

Параметри траєкторії снаряда розраховані методом чисельного інтегрування диференціальних рівнянь просторового руху його центра мас. У моделі польоту снаряда застосована кусково-лінійна інтерполяція функції  $c_x^*(M)$ , заданої таблицею.

За станцію ЗТВ обрано:

1) радіотехнічну станцію «Кама-Н»,

2) мобільну комбіновану лазерну інформаційно-вимірювальну систему (КЛІВС) з лазерним, телевізійним та інфрачервоним каналами [6 – 8].

Мобільна КЛІВС заснована на використанні двох модулів: лазерного та оптико-електронного (ОЕМ), який складається з телевізійного і інфрачервоного каналів. За допомогою лазерного модуля, який використовує потужне лазерне випромінювання, здійснюється кутове автоматичне супроводження літального апарата (ЛА) у широкому діапазоні дальності, починаючи з початку його польоту, при одночасному високоточному вимірюванні кутів азимута і місця, похилої дальності, радіальної і кутових (тангенціальних) швидкостей, а також видача команд керування на ЛА. За допомогою ОЕМ здійснюється об'єктивний контроль ЛА у реальному масштабі часу в денних і нічних умовах. Крім того, за умови формування сигналів, що зондують, з просторовою модуляцією поляризації та їх обробки з використанням матриці розповсюдження мобільна КЛІВС забезпечує розпізнавання ЛА.

Основне призначення КЛІВС – це зовнішньотраєкторні вимірювання (вимірювання параметрів руху) ЛА під час проведення випробувань на полігонному випробувальному комплексі.

При цьому, завдяки раціональному вибору типу джерела лазерного випромінювання і режиму, можливо збільшити енергетичний потенціал мобільної КЛІВС та обрати необхідну дальність її роботи.

Показники вимірювань параметрів зазначеними станціями наведені в табл. 1.

Похибки визначення координат вимірювальних станцій  $\sigma_{x_0(y_0)} = 10^{-3}$  м. Для спрощення розрахунків прийнято кут  $\varphi = 0$ .

Результати розрахунків при використанні КЛІВС наведені в табл. 2, де

$$\delta c_x = \frac{\sigma_{c_x}}{c_x} 100\%.$$

При вказаних значеннях показників точності вимірювання КЛІВС отримані такі значення СКВ розрахунку параметрів руху снаряда:

$$\sigma_s = 0,57 \text{ м}; \quad \sigma_v = 2,6 \text{ м/с};$$

$$\sigma_{\dot{v}} = 5,8 \text{ м/с}; \quad \sigma_\theta = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ рад}.$$

Таблиця 1. Значення показників точності вимірювань параметрів

Найменування системи	Призначення	Максимальні можливості	Характеристики точності
«Кама-Н»	вимірювання параметрів руху Д; $\alpha$ ; $\beta$	Д = 25 км; $\alpha = 0 \dots 360^\circ$ , $\beta = 5 \dots 90^\circ$	за відбитим сигналом: $\sigma_D = 8,14$ м, $\sigma_{\alpha, \beta} = 5'$
КЛІВС	вимірювання параметрів руху Д; Д'; $\alpha$ ; $\beta$ ; $\alpha'$ ; $\beta'$	Д = 150 км	за відбитим сигналом: $\sigma_D < 0,4$ м; $\sigma_{\alpha, \beta} < 0,2''$ ; $\sigma_{D'} < 0,1$ м/с; $\sigma_{\alpha', \beta'} < 0,2''$

Таблиця 2. Результати розрахунків при використанні станції КЛІВС

Параметри	№ вузлової точки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_x$	0,267	0,283	0,301	0,321	0,343	0,368	0,396	0,427	0,462	0,501
$\sigma_{C_x}$	0,034	0,036	0,038	0,041	0,044	0,046	0,05	0,053	0,057	0,062
$\delta C_x, \%$	12,8	12,8	12,8	12,7	12,7	12,6	12,5	12,5	12,4	12,3

Отримані розрахунки вказують на те, що точності показники станції «Кама-Н» дозволяють розрахувати значення  $\sigma_{C_x}$  з відносною похибкою  $\delta C_x = (80 \dots 85) \%$ .

Аналіз впливу похибок вимірювальної станції на точність оцінки величини  $\sigma_{C_x}$  вказує на те, що для отримання відносною похибки  $\delta C_x \leq 0,45 \%$  при інших рівних умовах необхідна точність вимірювання дальності  $\sigma_D \leq 0,01$  м. При цьому похибки розрахунків параметрів руху снарядів будуть складати:

$$\sigma_{C_x} \leq 0,0012; \quad \sigma_S \leq 0,02 \text{ м}; \quad \sigma_V \leq 0,1 \text{ м/с};$$

$$\sigma_{\dot{V}} \leq 0,2 \text{ м/с}; \quad \sigma_{\theta} \leq 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ рад}.$$

### Висновки

Станція зовнішньо-траєкторних вимірювань «Кама-Н» непридатна до застосування на етапі льотних випробувань для проведення уточнення значень коефіцієнта  $C_x(M)$  сили лобового опору снарядів, отриманих на попередніх етапах проектування.

Застосування КЛІВС дозволить отримати значення функції  $C_x(M)$  з відносною похибкою, що допустимо,  $\delta C_x = (10 \dots 15) \%$ , але не прийнята для проведення високоточних балістичних розрахунків.

Для задоволення вимог з точності балістичних розрахунків необхідна станція зовнішньотраєкторних вимірювань, що забезпечить похибки вимірювання дальності не гірше ніж  $\sigma_D \leq 0,01$  м.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика : учеб. для студентов вузов. М. : Машиностроение, 2005. 608 с.
2. Костров А. В., Шатило А. М. Модельно-экспериментальные методы определения аэромеханических характеристик летательных аппаратов на баллистических трассах. – М. : МО СССР, 1982. 195 с.

3. Экспериментальная баллистика ракетно-космических средств : учеб. для вузов / под ред. Л. Н. Лысенко, В. В. Бетанова, И. В. Лысенко. М. : ВА РВСН им. Петра Великого, 2000.
4. Дзевєрін І. Г., Журавльов О. О., Коломійцев О. В., Орлов С. В. Обчислення швидкості і прискорення снаряда методом інтерполяційних поліномів віртуальних систем координат при оцінці коефіцієнта сили лобового опору // Системи озброєння і військова техніка. 2017. Вип. 1 (49). С. 57–62.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправл. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 544 с.
6. Коломійцев О. В., Клівець С. І., Руденко Д. В. Мобільна комбінована лазерна інформаційно-вимірювальна система // Системи озброєння і військова техніка / ХУПС. 2014. Вип. 3 (39). С. 108–110.
7. Патент на корисну модель № 55645, Україна, МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Частотно-часовий метод пошуку, розпізнавання та вимірювання параметрів руху літального апарата / О. В. Коломійцев. № u201005225; заяв. 29.04.2010; опубл. 27.12.2010; Бюл. № 24. 14 с.
8. Патент на корисну модель № 102676, Україна, МПК G01 S 17/42, G01 S 17/66. Мобільна суміщена інформаційно-вимірювальна система / Л. Б. Курцева, О. В. Коломійцев, І. І. Сачук [та ін.]. № u201505115; заяв. 25.05.2015; опубл. 10.11.2015; Бюл. № 21. 6 с.

**Рецензент О. І. Тимочко**, д-р техн. наук, проф. (Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба)

УДК 621.391

**Р. М. ЖИВОТОВСЬКИЙ,***кандидат технічних наук**(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)*

## Аналіз методів оцінки каналів управління та передачі даних комплексів протиповітряної оборони

*Проведений аналіз відомих методів оцінки стану каналів управління та передачі даних комплексів протиповітряної оборони, що функціонують в умовах активного радіоелектронного подавлення. Проаналізовані недоліки та переваги відомих методів.*

**Ключові слова:** радіоелектронна обстановка, навісисні завади, протиповітряна оборона, методи аналізу.

*Проведен анализ известных методов оценки состояния каналов управления и передачи данных комплексов противовоздушной обороны, которые функционируют в условиях активного радиоэлектронного подавления. Проанализированы недостатки и преимущества известных методов.*

**Ключевые слова:** радиоэлектронная обстановка, преднамеренные помехи, противовоздушная оборона, методы анализа.

Завадозахищеність приймання сигналів у сучасних комплексах протиповітряної оборони (ППО), що функціонують у складній радіоелектронній обстановці [1], значною мірою залежить від точності оцінки стану їхніх каналів управління та передачі даних, яка визначається передаточною характеристикою [1–3]. При наявності об'єктивної та точної інформації про стан каналів передачі даних є можливість здійснювати заходи, спрямовані на підвищення завадозахищеності функціонування комплексів ППО.

Тому **метою** статті є проведення аналізу існуючих методів оцінювання стану каналів управління та передачі даних комплексів ППО в умовах радіоелектронного подавлення та багатопроменевого поширення радіохвиль.

Для вирішення наукової задачі використані методи аналізу та синтезу складних технічних систем, теорії завадозахищеності радіотехнічних систем та методи математичного моделювання.

Задача оцінки передаточної характеристики каналів управління та передачі даних може бути подана як знаходження значень їх імпульсної характеристики або відповідних значень частотної характеристики.

Необхідність забезпечення високої точності оцінки каналів обмежує ефективність практичного застосування сучасних комплексів ППО. Уникнути даної проблеми можна за допомогою розробки робастних відносно помилок оцінювання каналів алгоритмів приймання. Однак такий підхід, як показано в [4], не завжди здатний забезпечити задовільні результати, і, як правило, призводить до істотного ускладнення радіоелектронного обладнання.

Визначення структури і параметрів систем за спостереженнями є одним з основних завдань сучасної теорії і техніки автоматичного управління. Це завдання виникає при вивченні властивостей і особливостей об'єктів з метою подальшого управління ними, і, як наслідок, створення адаптивних систем, в яких на основі ідентифікації об'єкта виробляються оптимальні управляючі впливи.

Під ідентифікацією розуміють визначення структури системи та її параметрів шляхом аналізу вхідних і вихідних даних даної системи [3–5]. Головним завданням ідентифікації є визначення кращої в деякому розумінні оцінки характеристики об'єкта.

Розрізняють *параметричну* та *непараметричну* ідентифікацію.

При використанні методів параметричної ідентифікації відразу визначаються коефіцієнти передаточної функції або рівняння об'єкта. Друга група методів використовується для визначення часових або частотних характеристик об'єктів, а також характеристик випадкових, генерованих об'єктами процесів. За отриманими характеристиками визначаються передаточна функція або рівняння об'єкта.

Розглянемо спочатку докладніше методи **непараметричної ідентифікації**.

*Визначення передаточної функції за часовими характеристиками об'єкта.* Як відомо, диференціальні рівняння і передаточна функція є найбільш загальними формами зв'язку між змінними стану на вході і виході

лінійної системи. Великого поширення набули методи ідентифікації детермінованих об'єктів шляхом визначення перехідної характеристики  $h(t)$  за кривою розгону при ступінчастій зміні управління на вході:

$$h(t) \approx \frac{y(t) - y_0}{u - u_0}, \quad (1)$$

де  $y(t)$  – зміна вихідної величини об'єкта при подачі на його вхід ступінчастого управління  $u$  (крива розгону),  $y_0$  і  $u_0$  – значення виходу і входу об'єкта до початку проведення експерименту.

Якщо об'єкт управління не допускає зміни вихідної координати, то на його вхід замість ступінчастої дії подають одиничний імпульс або серію імпульсів.

*Визначення передаточної функції за частотними характеристиками об'єкта.* Сутність методу полягає в тому, що спочатку експериментально знімають частотні характеристики об'єкта, а потім за отриманими експериментальними характеристиками розраховують передаточну функцію. При знятті частотних характеристик використовують такі методи впливу на об'єкт, як метод синусоїдальної хвилі та метод „прямокутної” хвилі [7–9].

Основним недоліком розглянутих методів є тривалий час експерименту, що витрачається, в основному, на очікування сталого режиму коливань і отримання достатніх для апроксимації частотних характеристик значень.

*Кореляційний метод ідентифікації.* Вихідні змінні об'єкта  $y(t)$  визначаються не тільки детермінованими керуючими вхідними сигналами  $u(t)$ , але і некерованими впливами (завадами)  $e(t)$ , що можуть мати місце і викликати відхилення вихідних змінних від заданих значень. Щоб отримати рівняння зв'язку між статистичними характеристиками входу і виходу для стаціонарних ергодичних процесів, користуються їх статистичними характеристиками і, зокрема, кореляційними функціями або спектральною щільністю ймовірностей. Для підвищення точності оцінок кореляційних функцій необхідно правильно вибирати інтервал спостереження сигналів, для яких оцінюються ці кореляційні функції.

*Ідентифікація параметрів об'єкта спектральним методом.* Спектральні методи ідентифікації засновані на використанні апарату матричних операторів. Ці методи є подальшим розвитком частотних методів і ґрунтуються на розкладанні сигналів об'єкта за ортонормованими функціями, не обов'язково гармонійними. Результатом ідентифікації є визначення ядра інтегрального рівняння об'єкта, яке в простому випадку лінійних одновимірних систем співпадає з функцією ваги. Спектральні методи можуть застосовуватися для ідентифікації нестационарних систем, параметри яких, зокрема ядро інтегрального рівняння, змінюються в часі.

У комплексах ППО значно більшого поширення набули методи **параметричної ідентифікації** [10]. Параметрична ідентифікація дозволяє відразу знаходити значення коефіцієнтів моделі об'єкта за вимірюваними значеннями керованих  $y$  і керуючих  $u$  сигналів об'єкта.

При цьому вважається, що структура і порядок моделі об'єкта відомі.

Важливою перевагою методів параметричної ідентифікації є можливість використання рекурентних алгоритмів, що дозволяють проводити поточну ідентифікацію в реальному часі при номінальних режимах роботи об'єкта. До таких методів відносяться: метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності і метод стохастичної апроксимації.

*Метод найменших квадратів (МНК)* [10]. Використання звичайного МНК при впливі корельованих у часі шумів, тобто при мінімізації функції втрат за критерієм найменших квадратів, викликає зміщення оцінок параметрів – збільшення дисперсії даних оцінок. Погіршення цих оцінок призводить до зниження якості управління. Для отримання незміщених оцінок використовується узагальнений МНК (УМНК). При використанні УМНК оцінюються параметри моделей об'єкта і шуму на його виході.

Даний метод застосовується при великих відношеннях сигнал/шум, оскільки при малих відношеннях він дає значне зміщення оцінок параметрів. Перевагою методу є те, що надійна збіжність оцінок вимагає відносно невеликого обсягу обчислень.

*Метод допоміжних змінних* [10]. Метод допоміжних змінних (МДЗ) використовується тоді, коли існує кореляція між шумом  $e(k)$  і елементами вектора даних  $\Psi(k+1)$ , і моделі об'єкта та шуму подані у вигляді повної моделі (3). Алгоритм ідентифікації за методом допоміжних змінних аналогічний алгоритму МНК. Для реалізації алгоритму вводять вектор допоміжних змінних. МДЗ дозволяє обчислити тільки оцінки параметрів об'єкта ідентифікації.

Метод забезпечує досить точну оцінку параметрів. Він використовується при високій інтенсивності завад і їхньої кореляції зі змінними об'єкта. Для прискорення збіжності оцінок на початковому етапі рекомендується використовувати рекурентний МНК. Недоліком є великий обсяг обчислень.

*Метод стохастичної апроксимації* [10]. Метод стохастичної апроксимації (МСА) розроблено для визначення коренів рівняння, якщо значення функції при заданому значенні аргументу спостерігаються при наявності завад. МСА організовує деяку послідовність рішень для знаходження оцінки вектора параметрів при кожному вимірюванні  $\hat{\theta}(k)$  таку, що

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{\theta}(k) = \theta. \quad (2)$$

МСА легко переноситься на завдання визначення параметрів у стохастичних системах в умовах послідовного отримання оцінок (рекурентна ідентифікація).

Недолік МСА – повільна збіжність оцінок  $\hat{\theta}(k)$ , навіть якщо дисперсія  $e(k)$  є істотно меншою за дисперсію  $y(k)$ . Не дивлячись на повільну збіжність оцінок, алгоритми МСА завдяки своїй простоті знаходять застосування в практичних задачах ідентифікації лінійних і нелінійних моделей об'єктів з незалежним адитивним шумом.

Прийнятна точність оцінки при використанні методу досягається при дуже великому числі вимірювань. При малих обсягах обчислень і шумах високої інтенсивності всі методи (окрім МСА) мають однакову якість оцінок, отже перевагу віддають РМНК, оскільки він простіший за інші й гарантує збіжність оцінок. Перевага РММП проявляється при великих об'ємах вимірювань.

*Робастний метод оцінювання* [10]. Робастне оцінювання полягає в застосуванні ідей ММП у ситуації, коли форма або параметри розподілу, на якому заснований метод, визначені не повністю. Невизначеність виду розподілу можна описати за допомогою введення параметра, що належить множині  $\Xi$ . Тоді замість щільності, що фігурує в ММП, з'являється умовна щільність  $p(y | \tau, \xi)$ . Рішення задачі полягає у виборі «найгіршого» в множині  $\Xi$  значення  $\xi^*$ , параметра  $\xi$  з подаль-

шим використанням ММП, заснованого на щільності  $p(y | \tau, \xi^*)$ . Саме ця ідея отримала визнання і розви-

ток і відома як *робастне оцінювання*, або *стабільний ММП* [12].

*Метод максимальної ентропії (Берга)* [10]. Метод максимальної ентропії Берга [5, 10] відноситься до категорії параметричних методів спектрального аналізу. У подібних методах у відповідність до досліджуваного процесу задається завжди апіорна модель спектральної щільності і ставиться завдання оцінки параметрів моделі на основі аналізу досліджуваного часового ряду. У методі Берга використовується варіаційний принцип, і для оцінки якості моделі шукається процес з максимальною ентропією або процес, спектр якого відповідає найбільш випадковому часовому ряду, причому кореляційна функція цього ряду повинна найкращим чином збігатися із заданою послідовністю. Оцінка спектральної щільності в методі Берга аналогічна оцінці за допомогою авторегресійної моделі першого порядку з вхідним білим шумом. Метод Берга має, мабуть, найвище спектральне розрізнення серед усіх спектральних методів.

До недоліків методу слід віднести відсутність точної інформації про величини амплітуд і фаз виявлених гармонік, а також необхідність попереднього підбору порядку параметра авторегресії, тому що при великих параметрах, що чисельно перевищують половину довжини ряду, оцінки за цим методом можуть бути нестабільними і, зокрема, може відбуватися розщеплення спектральних компонент. Відзначимо також, що метод не призначений для роботи з простими гармонійними сигналами.

Нижче розглянуті алгоритми оцінки каналів, побудовані на застосуванні розглянутих методів ідентифікації.

*Алгоритм оцінки параметрів каналу з використанням точно відомих (пілотних) і невідомих інформаційних символів* [10]. Оцінка найменших квадратів і зважена оцінка за мінімумом квадратів помилок ІХ каналу за тестовими символами має вигляд

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{МНК}} = (\mathbf{X}_p^H \mathbf{W} \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{W} \mathbf{y}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{X}_p^H$  – матриця відліків з пілотними сигналами й імпульсною характеристикою,  $\mathbf{W}$  – матриця відліків адитивного шуму з нульовим середнім значенням і кореляційною матрицею  $\mathbf{R}_w = E\{\mathbf{w} \mathbf{w}^H\}$ ,  $\mathbf{X}_p$  – матриця відліків з пілотними сигналами.

Складність алгоритму оцінювання за допомогою пілотних символів невисока, оскільки матриця  $(\mathbf{X}_p^H \mathbf{W} \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{W}$  відома і може бути обчислена заздалегідь не в реальному масштабі часу з будь-якою необхідною точністю. За відсутності апіорної інформації про символи, що передаються, оцінка ІХ завжди буде нульовою, тому практично вказані способи оцінки можуть використовуватися тільки при ітеративному алгоритмі прийому на всіх ітераціях, окрім першої, будучи альтернативою запропонованому нижче МП алгоритму.

Перевагою розглянутого алгоритму оцінювання є те, що він не вимагає знання статистики шуму ні в якій формі. Алгоритми, що розглядаються далі, цією властивістю не володіють.

*Середньоквадратичне відхилення оцінки (СКВ)* є зручною характеристикою її якості. Відомо, що з цього погляду кращою оцінкою буде мінімальне середньоквадратичне відхилення оцінки (МСКВ), що є апостеріорно середнім. У разі, коли  $\mathbf{h}$  і  $\mathbf{y}$  гаусівські, його можна отримати таким чином:

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{МСКВ}} = \bar{\mathbf{h}} + \mathbf{R}_{hy} \mathbf{R}_y^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{h}}), \quad (4)$$

де  $\bar{\mathbf{h}} = E\{\mathbf{h}\}$ ,  $\mathbf{R}_{hy} = E\{(\mathbf{h} - \bar{\mathbf{h}})(\mathbf{y} - E\{\mathbf{y}\})^H\}$ .

*Методи оцінювання каналів при ітеративних способах обробки сигналу на прийомі* [10]. МП алгоритм оцінювання вектора відліків ІХ. МП алгоритм – це спосіб ітеративного максимально правдоподібного оцінювання, зручний у випадку, коли є невідомі супутні параметри, наприклад інформаційні символи [6–11].

Ключова ідея МП алгоритму полягає в такому виборі повного набору даних  $\mathbf{z}$ , щоб інтеграція і максимізація могли б бути легко виконані. Основна властивість даного алгоритму полягає в тому, що  $p(y | \hat{\Theta}_{\text{МП}}^{(i+1)}) \geq p(y | \hat{\Theta}_{\text{МП}}^{(i)})$ , тобто функція правдоподібності монотонно зростає на кожному подальшому етапі оцінки. У загальному випадку МП алгоритм сходиться до локального максимуму функції правдоподібності  $p(y | \Theta)$ . Здатність досягнення глобального максимуму залежить від початкових умов. Швидкість збігу залежить від вибору повної множини даних  $\mathbf{z}$ .

Основна складність розрахунку полягає у використанні апостеріорної функції щільності розподілу ймовірності, що вводить статистичну залежність між ітераціями і зрештою призводить до залежності величини зміщення від початкових умов.

*Субоптимальний алгоритм ітераційного оцінювання каналу та інформаційних символів на основі МП алгоритму* [10]. МП алгоритм заснований на використанні апостеріорної інформації про інформаційні символи, отже його використання в ітераційних процедурах



прийому вимагає їх реініціалізації після кожного циклу оцінки  $\mathbf{h}$ , тобто обнулення „зовнішньої” інформації всіх модулів, що подається по каналах зворотного зв'язку на входи для апіорної інформації всіх модулів обробки. Це істотно збільшує кількість ітерацій і, як наслідок, обсяг обчислювальних витрат. Якщо не проводити реініціалізацію алгоритму прийому після кожного циклу оцінки, то будуть порушені турбопринципи, і сам алгоритм оцінки вже не буде МП алгоритмом. Проте цей прийом приведе до істотного скорочення обсягу обчислень, тому застосування даного підходу цілком заслуговує на увагу.

Лінійна незміщена оцінка з мінімальною дисперсією (ЛНО) [10]. Дана оцінка обчислюється як  $\hat{\mathbf{h}}_{\text{ЛНО}} = \mathbf{A}\mathbf{y}$ , де матриця  $\mathbf{A}$  вибирається такою, щоб оцінка була незміщеною і СКВ помилки оцінки кожного елемента вектора  $\mathbf{h}$  була б мінімальною при оцінці тільки з використанням відомих тестових символів  $\mathbf{A} = (\mathbf{X}_p^H \mathbf{R}_w^{-1} \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{R}_w^{-1}$ .

При оцінюванні з використанням інформації, що міститься в невідомих інформаційних символах

$$\mathbf{A} = (E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\} \mathbf{R}_\Sigma^{-1} E_x^{(e)} \{\mathbf{X}\})^{-1} E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\} \mathbf{R}_\Sigma^{-1}, \quad (5)$$

де

$$\mathbf{R}_\Sigma = \mathbf{R}_w + E_x^{(e)} \{\mathbf{X} \mathbf{h} \mathbf{h}^H \mathbf{X}^H\} - E_x^{(e)} \{\mathbf{X}\} \mathbf{h} \mathbf{h}^H E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\}. \quad (6)$$

Як видно з формули (6), для оцінювання потрібно знати  $\mathbf{h}$ . Як  $\mathbf{h}$  може використовуватися попередня оцінка  $\hat{\mathbf{h}}$ , наприклад, отримана на попередній ітерації, а на першій ітерації – оцінка, отримана за допомогою якого-небудь з методів, що не вимагають апіорної інформації. Якщо є апіорна інформація про  $\mathbf{h}$  у формі  $p(\mathbf{h})$ , то

$$\mathbf{A} = (E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\} (E_h \{\mathbf{R}_\Sigma\})^{-1} E_x^{(e)} \{\mathbf{X}\})^{-1} E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\} (E_h \{\mathbf{R}_\Sigma\})^{-1}. \quad (7)$$

На відміну від попередніх способів оцінки даний метод вимагає обов'язкової наявності апіорної інформації про канал і знання статистики шуму (у загальному випадку – у вигляді його кореляційної матриці  $\mathbf{R}_w$ ).

Лінійне оцінювання за мінімумом середньоквадратичного відхилення (МСКВ) [10]. Така оцінка визначається як  $\hat{\mathbf{h}}_{\text{МСКВ}} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{b}$ , де матриця  $\mathbf{A}$  і вектор  $\mathbf{b}$  обираються так, щоб оцінка була незміщеною і мала мінімальну помилку для кожного компонента вектора  $\mathbf{h}$ .

Якщо  $E_h \{\mathbf{h}\} = \bar{\mathbf{h}}$  і  $E \{(\mathbf{h} - \bar{\mathbf{h}})(\mathbf{h} - \bar{\mathbf{h}})^H\} = \mathbf{R}_h$ , то

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{МСКВ}} = \bar{\mathbf{h}} + \mathbf{R}_h E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\} (E_h \{\mathbf{R}_\Sigma\} + E_x^{(e)} \{\mathbf{X}\} \mathbf{R}_h E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\})^{-1} (\mathbf{y} - E_x^{(e)} \{\mathbf{X}\} \bar{\mathbf{h}}), \quad (8)$$

де  $\mathbf{R}_\Sigma$  обчислюється за (6) і, відповідно,

$$E_h \{\mathbf{R}_\Sigma\} = \mathbf{R}_n + E_x^{(e)} \{\mathbf{X} \mathbf{R}_h \mathbf{X}^H\} - E \{\mathbf{X}\} \mathbf{R}_h E \{\mathbf{X}^H\} + E \{\mathbf{X} \bar{\mathbf{h}} \bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{X}^H\} - E_x^{(e)} \{\mathbf{X}\} \bar{\mathbf{h}} \bar{\mathbf{h}}^H E_x^{(e)} \{\mathbf{X}^H\}.$$

На відміну від ЛНО оцінка (8) можлива за відсутності інформації про інформаційні символи, тобто при  $E \{\mathbf{X}\} = 0$ .

Так само як і в разі ЛНО, дане оцінювання може використовувати наявну апіорну інформацію про канал (зберігаючи працездатність у разі її відсутності) і вимагає знання статистики шуму (у загальному випадку – кореляційної матриці шуму  $\mathbf{R}_w$ ).

Таким чином, можна зробити такі **висновки**:

1. При наявності достатньої апіорної інформації про інформаційні символи, що передаються, кращі результати за критерієм співвідношення точності оцінки і складності реалізації демонструє алгоритм лінійного оцінювання за мінімумом СКВ.

2. За відсутності достатньої апіорної інформації про символи, що передаються, кращим є незміщений варіант оцінки за мінімумом найменших квадратів.

3. Для підвищення точності оцінювання передаточної характеристики каналів комплексів ППО в умовах складної радіоелектронної обстановки доцільно використовувати ітеративні принципи.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку комбінованого методу оцінки стану каналів комплексів ППО в складній радіоелектронній обстановці.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 211 с.
2. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М. : Наука. Физматлит, 1995. 336 с.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 301 с.
4. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применение. М. : Наука, 1968. 548 с.
5. Нечаев Ю. Б., Малютин А. А. Методы оценки параметров многолучевого канала связи при итеративных алгоритмах приема // Теория и техника радиосвязи. 2009. Вып. 2. С. 35–43.
6. Уоткинс Д. Основы матричных вычислений. М. : Бином, 2006. 664 с.
7. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М. : Сов. радио, 1986. 368 с.
8. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов. М. : Мир, 1976. 756 с.
9. Бриллинджер Д. Временные ряды. М. : Мир, 1980. 536 с.
10. Савараги Е., Созда Т., Накимозо Т. “Классические” методы и оценивание временных рядов. М. : Мир, 1983.
11. Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis, Ph.D. Dissertation. Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, Calif, May 1975.
12. Савченко В. В. Обнаружение и прогнозирование разладки случайного процесса на основе спектрального оценивания // Автометрия. 1996. № 2. С. 77–84.

**Рецензент О. В. Крилов**, старший науч. співробітник (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)

УДК 621.396.6

**Д. Б. КУЧЕР,**

доктор технічних наук, професор  
(Інститут Військово-Морських Сил  
Національного університету «Одеська морська  
академія», м. Одеса),

**О. І. ФИК,** кандидат технічних наук, доцент,**Р. О. ГОНЧАР,** кандидат військових наук

(Національна академія Національної гвардії  
України, м. Харків)

## Моделювання процесу утворення електромагнітного поля надпровідними фрактальними частотно- вибірковими решітками у складі плоских дводзеркальних антен

*Наведені результати чисельного дослідження багаточастотних частотно-вибіркових фрактальних надпровідних поверхонь, отримані за допомогою математичної моделі мультирешіткової багаточислової електродинамічної структури на основі плоских двоперіодичних решіток друкованих елементів у складі дводзеркальних антен.*

**Ключові слова:** гібридна дзеркальна антена, мікросмугова антенна решітка, частотно-вибіркова решітка, високотемпературний надпровідник, інтегральне рівняння, мікросмугова дифракційна решітка, дводзеркальна антена, смуговий загороджувальний фільтр, смуговий пропускаючий фільтр, просторова матриця розсіювання.

*Представлены результаты численного исследования многочастотных, частотно избирательных, фрактальных сверхпроводимых поверхностей, полученные с помощью математической модели многослойной электродинамической структуры на основе плоских двоякопериодических решеток печатных элементов в составе двухзеркальных антенн.*

**Ключевые слова:** гибридная зеркальная антенна, микрополосовая антенная решетка, частотно избирательная решетка, высокотемпературный сверхпроводник, интегральное уравнение, микрополосовая дифракционная решетка, двухзеркальная антенна, полосовой заграждающий фильтр, полосовой пропускающий фильтр, пространственная матрица рассеивания.

Одним з найбільш поширених застосувань частотно-вибіркових решіток (ЧВР), що працюють у декількох частотних діапазонах, є гібридні дзеркальні антени (ГДА).

У сучасних радіотехнічних систем (РТС) все частіше стали використовувати мікросмугові антенні решітки (МСАР), які виготовляються з використанням методів інтегральної технології, що дозволяє істотно зменшити габарити, масу і вартість антенних пристроїв. Тому значний інтерес до розробки математичних моделей таких решіток по теперішній час не втрачає. Зараз розроблено багато математичних моделей (у тому числі програм (CSC, MW Office та ін.), що описують МСАР з різним ступенем точності. Однак питанню аналізу відбиваючих МСАР та дифракційних решіток з мікросмугових елементів (МСЕ) довільної структури та надпровідного матеріалу дотепер приділяється мало уваги. А саме, вивчення механізму розсіювання електромагнітних хвиль (ЕМХ) мікросмуговими дифракційними решітками (МДР) має практичний інтерес при розробці різного роду перетворювачів хвиль відбиваючого типу, антенних обтікачів, кутових фільтрів, що зменшують бічне випромінювання апертурних антен, антенних електромагнітних обмежувачів деструктивної потужності і т. п.

З одного боку, у ряді робіт [1, 2], присвячених питанням дослідження параметрів МСАР, розглядаються проблеми дифракції, однак там вони не мають самостійного значення. З іншого боку, в роботах, присвячених дифракційним решіткам, не досліджуються решітки з МСЕ. Так, у фундаментальних роботах, присвячених дослідженню дифракції хвиль на решітках [3–4], описані загальні закономірності розсіювання хвиль і специфічні властивості відбиваючих і напівпрозорих решіток, гребінок, структур хвилевідного типу, смугових та діелектричних решіток. Не дивлячись на велику різноманітність, досліджені решітки є одновимірною-періодичними структурами, що не дозволяє безпосередньо використовувати результати чисельно-аналітичних досліджень, наведених в цих роботах, при розробці МДР. Пізніше до дослідження питань розсіювання хвиль плоскими МДР виявили цікавість і інші автори [5]. Однак у розрахунках наявність надпровідних елементів [5] у решітках не передбачалась.

**Мета** статті – одержання системи інтегральних рівнянь щодо моделі електромагнітного поля фрактальних частотно-вибіркових надпровідних решіток у складі плоских дводзеркальних антен.

### 1. Змістовний опис електромагнітної моделі.

Перш ніж перейти до формулювання граничного завдання, зупинимось на одному з основних спрощуючих припущень, що дозволяють перейти від реальної МДР до її математичної моделі. Припустимо, що плоска МДР має великі електричні розміри. У таких решітках основна маса елементів центральної області знаходиться в майже однакових умовах і не відчуває впливу країв. Найбільш важливі особливості її поведінки можуть бути достатньо точно описані поведінкою елементів МДР, що знаходяться у складі нескінченних решіток. Тому математична модель нескінченних решіток може з успіхом служити для аналізу МДР великих електричних

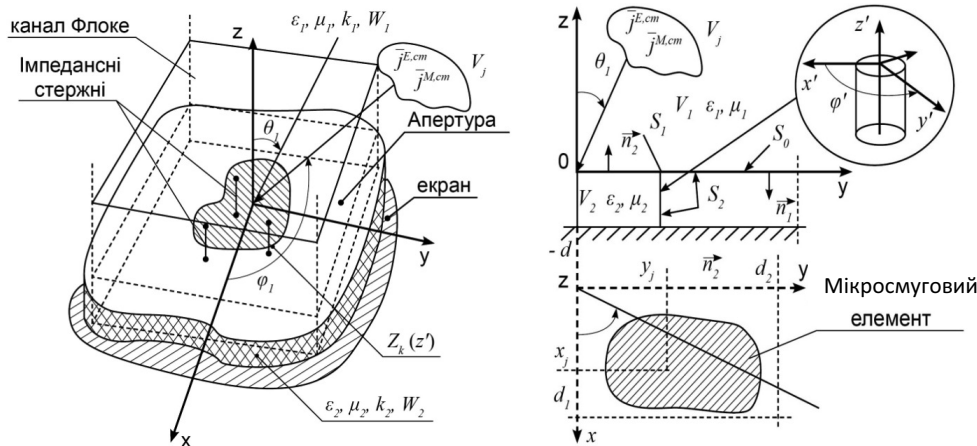


Рис. 1. Мікросмугова відбиваюча антенна решітка з імпедансними штирями:  
 а – канал Флоке решітки відбиваючого типу; б – постановка електродинамічної задачі

розмірів. При необхідності для обліку кінцевих розмірів решіток можна скористатися методом крайових хвиль [6].

Розглянемо таке граничне завдання. Хай над нескінченною ідеально провідною (або надпровідною) площиною розташований нескінченний шар однорідного магнітодіелектрика (підкладки) товщиною  $V_2$ . На поверхні шару у вузлах двоперіодичної нескінченно протяжної сітки з прямокутною формою осередку розташовані МСЕ довільної форми (рис. 1), де  $d_1, d_2$  – періоди решітки уздовж осей  $x$  і  $y$ , відповідно.

Мікросмугові елементи вважатимемо ідеально провідними. У шарі підкладки розташовані імпедансні штирі, що шунтують в  $N$  точках кожний МСЕ. Імпедансні штирі є провідними штирями, навантаженими на зосереджені навантаження, кожний з яких має керований поверхневий імпеданс. Розподіл поверхневого імпедансу зосереджених навантажень уздовж  $k$ -го імпедансного штиря описується функцією  $Z_k(z')$ . При побудові математичної моделі функція  $Z_k(z')$  є заданою. Для визначення  $Z_k(z')$  можна користуватися схемою заміщення реального НВЧ приладу або експериментальними результатами для поверхневого імпедансу реальних керованих навантажень. Джерела збудження  $j^{E,ct}$ ,  $j^{M,ct}$  знаходяться в об'ємі  $V_j$ , що займає частину об'єму  $V_1$  (рис. 1). Об'єм  $V_1$  займає весь верхній півпростір  $z > 0$ . Для багатоелементних ВАР найбільший інтерес

становить випадок збудження перевипромінювачами решітки локально плоскою хвилею, що створюється вимірними джерелами в місці розташування ВАР, коли відстань між областю  $V_j$  та решіткою  $R_j$  прямує до нескінченності, використовуючи при цьому наближення локальної періодичності.

Параметри середовищ в об'ємах  $V_1, V_2$  відповідно  $\tilde{\epsilon}_{1,2}, \tilde{\mu}_{1,2}, k_{1,2}, W_{1,2}$ , де  $\tilde{\epsilon}_{1,2}$  і  $\tilde{\mu}_{1,2}$  – відповідно комплексні діелектрична і магнітна проникності,  $k_{1,2}$  – коефіцієнт поширення,  $W_{1,2}$  – характеристичний опір. Необхідно одержати систему інтегральних рівнянь (ІР), що описує поставлене завдання, привести її до матричного вигляду. Рішенням цієї системи буде шукана густина магнітного струму на вільних від МСЕ поверхні решітки і електричного струму на імпедансних стрижнях.

Оскільки при аналізі характеристик розсіювання мікросмугової ВАР найбільший інтерес становить резонансна область [7], то для вирішення поставленої задачі скористаємося методом інтегральних рівнянь [8]. При цьому одержане цим методом рішення буде загальним, тобто застосовним не тільки в резонансній області. Крім того, вимагається, щоб параболічна антена працювала в  $N$  частотних піддіапазонах:  $f_1, f_2, \dots, f_k$  – для чого застосовують такий прийом, як просторове рознесення фокусів параболі й установлення в них опромінювачів, кожен з яких забезпечує роботу дзеркальної антени (ДЗА) в

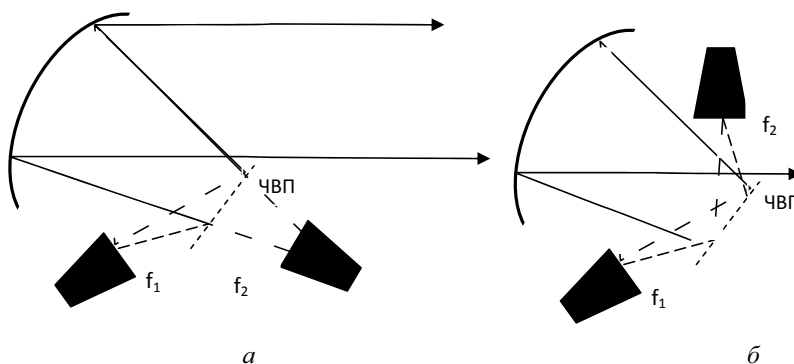


Рис. 2. Багаточастотні ДА з рознесеними опромінювачами

одному з її  $K$  частотних піддіапазонів. Задачу рознесення фокусів параболічної антени будемо вирішувати введенням до її складу частотно-вибіркових поверхонь (ЧВП). Для випадку  $K = 2$  схема побудови ГДА показана на рис. 2.

Частотно-вибіркова поверхня в цьому простому випадку повинна мати властивості смугового загороджувального фільтра (СЗФ) для електромагнітних хвиль (ЕМХ) першого піддіапазону ( $f_1$ ) та смугового пропускаяючого фільтра (СПФ) для ЕМХ другого піддіапазону ( $f_2$ ). Як показано вище, властивості СЗФ мають ЧВП у вигляді решіток пластин, а властивості СПФ – ЧВП у вигляді решіток апертур. Для випадку  $K > 2$  ЧВП повинна функціонувати як СЗФ або СПФ вже не в одному, а в декількох піддіапазонах частот робочого діапазону ГДА. Таким чином, ЧВП має бути багаточастотною.

## 2. Формулювання інтегральних рівнянь при побудові математичної моделі мікросмугової антенної решітки відбиваючого типу

2.1. Інтегральні співвідношення і граничні умови для мікросмугової решітки з імпедансними штирями (головне дзеркало ГДА). Запишемо співвідношення для полів в кожній з областей, використовуючи теорему Лоренца в інтегральній формі. Для області  $V_1$  [9]

$$\sum_{V_1} \left\{ [E_1, H_1^B] - [E_1^B, H_1] \right\} n_1 dS' = \int_{V_1} (j_{B1}^M H_1 - j_{B1}^E E_1) dV' + \int_{V_1} (j^{E,cm} E_1^B - j^{M,cm} H_1^B) dV'. \quad (1)$$

Для області  $V_2$

$$\sum_{V_2} \left\{ [E_2, H_2^B] - [E_2^B, H_2] \right\} n_2 dS' = \int_{V_2} (j_{B2}^M H_2 - j_{B2}^E E_2) dV'. \quad (2)$$

де  $E_{1,2}$  і  $H_{1,2}$  – вектори напруженостей шуканих електричних і магнітних полів відповідно в областях  $V_1$  і  $V_2$ ;  $E_{1,2}^B$  і  $H_{1,2}^B$  – вектори напруженостей електричних та магнітних полів допоміжних джерел у  $V_1$  і  $V_2$ ;  $\sum_{V_1}$  – поверхня, що включає  $S_0$ ,  $S_1$  та поверхня нескінченної півсфери в області  $V_1$ ;  $\sum_{V_2}$  – поверхня, яка вміщує  $S_0$ ,  $S_2$  і  $S_k$  – поверхні всіх імпедансних штирів;  $n_1$  і  $n_2$  – зовнішні одиничні нормалі відповідних областей.

Як допоміжне джерело збудження для області  $V_1$  оберемо елементарні магнітні вібратори в півпросторі з ідеально провідною границею

$$j_{B1}^{Ect} = j_{B1}^E = 0, \quad j_{B1}^M = (I_0^M L) \nabla \delta(q - p), \quad j^{M,cm} = (I_0^M L) \xi \delta(q^0 - p), \quad (3)$$

де  $I_0^M L$  – момент магнітного струму джерела збудження (приймемо, що  $I_0^M L = 1$  В м),  $I_0^B L$  – момент магнітного струму допоміжного джерела (приймаємо, що  $I_0^B L = 1$  В м),  $\xi$  – одиничний вектор, що визначає орієнтацію, стороннього джерела,  $v = i_\tau$  або  $i_v$ . Нехай поле допоміжного джерела задовольняє граничній умові Е:

$$[n_1, E_1^E]_{\sum_{V_1}} = 0. \quad (4)$$

Як допоміжне джерело для області  $V_2$  виберемо елементарний магнітний вібратор, поле якого задовольняє граничній умові

$$[n_2, E_2^E]_{\sum_{V_2} - S_k} = 0, \quad (5)$$

де  $S_k$  – бічні поверхні всіх імпедансних штирів.

На поверхні  $S_i$  виконуються імпедансні граничні умови [9]

$$[E_2, n_2]_i = Z_i [n_2, [n_2, H_2]_i], \quad (6)$$

де  $i$  означає, що величини, які входять у (6) відносяться до  $i$ -го імпедансного штиря.

Всі подальші викладення ведуться з урахуванням того, що дотичні складові вектора напруженості електричного поля на ідеально провідних границях дорівнюють нулю, а також з урахуванням умов випромінювання на нескінченності.

### 2.2. Інтегральне рівняння для мікросмугової решітки без імпедансних штирів.

Оскільки, по-перше, електродинамічний аналіз мікросмугових ВАР, що не тільки містять імпедансні штирі, але й без них (наприклад, допоміжне дзеркало), становить значний практичний інтерес та, по-друге, для зручності викладу процедури побудови математичної моделі мікросмугово-штирьової ВАР спочатку необхідно сформулювати систему ІР для мікросмугової решітки без штирів.

Вираз (1) з урахуванням (4) та (3) прийме вигляд

$$\int_{S_0} [E_1, H_1^B] n_1 dS' = v H_1(p) - \xi H_1^B(q^0, p), \quad (7)$$

де  $S_0$  – поверхня решітки, вільна від мікросмугових елементів.

Розкриваючи векторний добуток у декартовій системі координат у (5), одержимо вираз для вектора напруженості магнітного поля в області  $V_1$

$$v H_1(p) = \int_{S_0} \{ E_{1y}(q) H_{1x}^B(q, p) - E_{1x}(q) H_{1y}^B(q, p) \} dS_q + \xi H_1^B(q^0, p). \quad (8)$$

Таким чином, одержано вираз для напруженості магнітного поля в області  $V_1$ . Тепер одержимо вираз для вектора напруженості магнітного поля в області  $V_2$ . Вираз (2) з урахуванням (5) прийме вигляд

$$\int_{S_0} [E_2, H_2^B] n_2 dS' = v H_2(p).$$

Розкриваючи векторний добуток у декартовій системі координат, одержимо

$$- \int_{S_0} \{ E_{2y} H_{2x}^B - E_{2x} H_{2y}^B \} dS' = v H_2(p). \quad (9)$$

Вираз (9) перепишемо у вигляді

$$v H_2(p) = - \int_{S_0} \{ E_{2y}(q) H_{2x}^B(q, p) - E_{2x}(q) H_{2y}^B(q, p) \} dS_q. \quad (10)$$

Отже, одержано вираз для вектора напруженості магнітного поля в області  $V_2$ .

Опускаючи точку спостереження  $p$  на межу розділу  $S_0$  (див. рис. 1, 3) та дотримуючись умови безперервності дотичних складових полів на межі розділу  $E_{1x}|_{S_0} = E_{2x}|_{S_0} = E_x|_{S_0}$ ,  $E_{1y}|_{S_0} = E_{2y}|_{S_0} = E_y|_{S_0}$ ,  $H_{1x}|_{S_0} = H_{2x}|_{S_0} = H_x|_{S_0}$ ,

$H_{1y}|_{S_0} = H_{2y}|_{S_0} = H_y|_{S_0}$ , з (8) та (10) одержимо систему з двох інтегральних рівнянь щодо дотичних складових вектора напруженості електричного поля  $E_x(q)$  і  $E_y(q)$  на  $S_0$ .

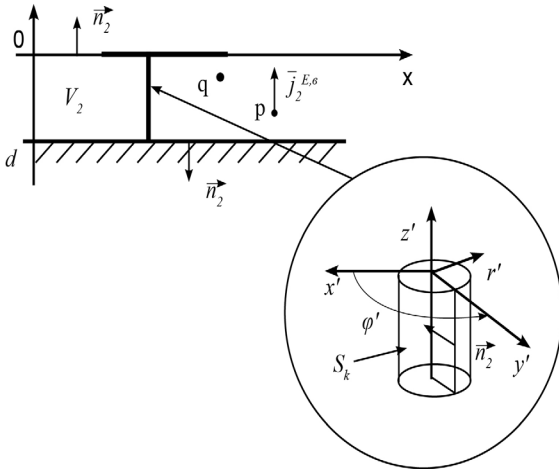


Рис. 3. Місцева циліндрична система координат на імпедансному штирі

Для того щоб задовольнити умови

$$H_{1x}|_{S_0} = H_{2x}|_{S_0}, H_{1y}|_{S_0} = H_{2y}|_{S_0}, \quad (11)$$

запишемо співвідношення для складових  $H_x$  і  $H_y$  окремо. Для отримання виразу для складової вектора напруженості магнітного поля  $H_x$  необхідно як допоміжне джерело вибрати елементарний магнітний вібратор з одиничним моментом  $v = 1_x$ . Підставимо  $v$  в (8) та (10), одержимо для областей  $V_1$  і  $V_2$  відповідно

$$H_{1x}(p) = \int_{S_0} \{E_{1y}(q) \tilde{H}_{1x}^B(q, p) - E_{1x}(q) \tilde{H}_{1y}^B(q, p)\} dS_q + \xi \tilde{H}_1^B(q^0, p), \quad (12)$$

$$H_{2x}(p) = - \int_{S_0} \{E_{2y}(q) \tilde{H}_{2x}^B(q, p) - E_{2x}(q) \tilde{H}_{2y}^B(q, p)\} dS_q. \quad (11)$$

Задовольняючи умови (11) для  $x$ -складових вектора напруженості магнітного поля, з (12) і (13) одержимо перше інтегральне рівняння системи

$$\int_{S_0} \{E_y(q) [\tilde{H}_{1x}^B(q, p) + \tilde{H}_{2x}^B(q, p)] - E_x(q) [\tilde{H}_{1y}^B(q, p) + \tilde{H}_{2y}^B(q, p)]\} dS_q = -\xi \tilde{H}_1^B(q^0, p), \quad (14)$$

де  $\tilde{H}_{1x}^B, \tilde{H}_{2x}^B, \tilde{H}_{1y}^B, \tilde{H}_{2y}^B$  – дотичні складові векторів напруженості магнітних полів допоміжних джерел, що створюються в кожній з областей елементарним магнітним вібратором з одиничним моментом, орієнтованим уздовж осі  $x$ .

Для отримання співвідношення, що визначає складову вектора напруженості магнітного поля  $H_y$ , необхідно як допоміжне джерело вибрати елементарний магнітний вібратор з одиничним моментом  $v = 1_y$ .

Після підстановки  $v$  в (8) і (10) і задоволення умови (11) для  $y$ -складових вектора напруженості магнітного поля одержимо друге ІР системи:

$$\int_{S_0} \{E_y(q) [\tilde{H}_{1x}^B(q, p) + \tilde{H}_{2x}^B(q, p)] - E_x(q) [\tilde{H}_{1y}^B(q, p) + \tilde{H}_{2y}^B(q, p)]\} dS_q = -\xi \tilde{H}_1^B(q^0, p), \quad (15)$$

де  $\tilde{H}_{1x}^B, \tilde{H}_{2x}^B, \tilde{H}_{1y}^B, \tilde{H}_{2y}^B$  – складові векторів напруженості допоміжних полів, що формуються в кожній з областей елементарним магнітним вібратором з одиничним моментом, орієнтованим уздовж осі  $y$ .

### 3. Використання умови періодичності друкованих елементів у решітках

Оскільки розглядаються періодичні решітки МСЕ, то в рівняннях (14) (15)  $S_0$  є системою апертур  $S_A$ , що періодично повторюються. Під апертурою  $S_A$  мається на увазі частина поверхні одиничного осередку решітки, не зайнята МСЕ, розташованими на ній. З урахуванням цього (14) та (15) приймуть вигляд

$$\sum_{M=-\infty}^{\infty} \sum_{N=-\infty}^{\infty} \int_{S_A} \{E_y(x' + Md_1, y' + Nd_2) \cdot [\tilde{H}_{1x}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y) + \tilde{H}_{2x}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y)] - E_x(x' + Md_1, y' + Nd_2) [\tilde{H}_{1y}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y) + \tilde{H}_{2y}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y)]\} dx' dy' = -\xi \tilde{H}_1^B(q^0, p), \quad (16)$$

$$\sum_{M=-\infty}^{\infty} \sum_{N=-\infty}^{\infty} \int_{S_A} \{E_y(x' + Md_1, y' + Nd_2) \cdot [\tilde{H}_{1x}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y) + \tilde{H}_{2x}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y)] - E_x(x' + Md_1, y' + Nd_2) [\tilde{H}_{1y}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y) + \tilde{H}_{2y}^B(x' + Md_1, y' + Nd_2; x, y)]\} dx' dy' = -\xi \tilde{H}_1^B(q^0, p), \quad (17)$$

де  $d_1$  і  $d_2$  – періоди решітки по осях  $x$  і  $y$  відповідно,  $M$  і  $N$  – індекси поелементного підсумовування.

3.1. Визначення правих частин інтегральних рівнянь (16) і (17).

Для визначення правої частини (16) потрібно знайти складові  $\tilde{H}_{1x}^B(q^0, p)$  і  $\tilde{H}_{1y}^B(q^0, p)$ . Для визначення правої частини (17) потрібно знайти складові  $\tilde{H}_{1x}^B(q^0, p)$  і  $\tilde{H}_{1y}^B(q^0, p)$ . Складові, що цікавлять нас, впливають з [9]

$$\left. \begin{aligned} \tilde{H}_{1,2x}^B &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \left( k_{1,2}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) A_{1,2x}^{M6} \\ \tilde{H}_{1,2y}^B &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \frac{\partial^2 A_{1,2x}^{M6}}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

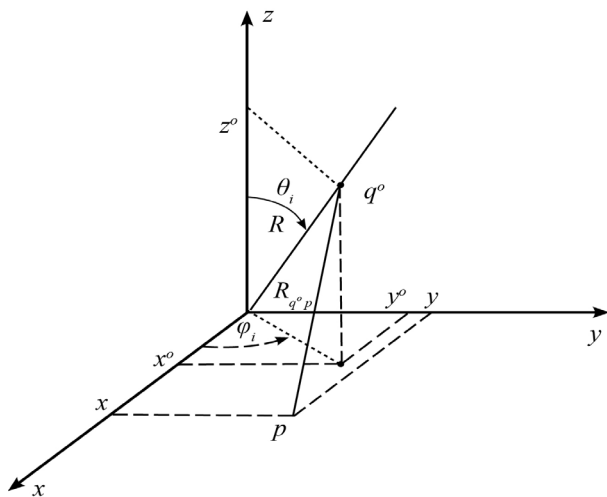


Рис. 4. Визначення правих частин системи інтегральних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \hat{H}_{1,2x}^e &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \left( k_{1,2}^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A_{1,2y}^{ms} \\ \hat{H}_{1,2y}^e &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \frac{\partial^2 A_{1,2y}^{ms}}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

де

$$A_{1\{x\}}^{MB} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{\exp(-ik_1 R_1)}{R_1} + \frac{\exp(-ik_1 R_2)}{R_2} \right), \quad (20)$$

де

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}, \\ R_2 &= \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2}. \end{aligned}$$

Зробивши необхідні обчислення для цього випадку, отримаємо з (18) і (19) такі співвідношення:

$$\tilde{H}_{1x}^B = \frac{2iG}{k_1 W_1} \left[ \frac{D}{R_{q^0 p}} - EA^2 - k_1^2 \right], \quad (21)$$

$$\tilde{H}_{1y}^B = \frac{2iG}{k_1 W_1} ABE, \quad (22)$$

$$\hat{H}_{1x}^B = \frac{2iG}{k_1 W_1} ABE, \quad (23)$$

$$\hat{H}_{1y}^B = \frac{2iG}{k_1 W_1} \left[ \frac{D}{R_{q^0 p}} - EB^2 - k_1^2 \right], \quad (24)$$

де

$$\begin{aligned} A &= \frac{x^0 - x}{R_{q^0 p}}, \quad B = \frac{y^0 - y}{R_{q^0 p}}, \quad D = \frac{1 + ik_1 R_{q^0 p}}{R_{q^0 p}}, \\ E &= D^2 + \frac{D}{R_{q^0 p}} + \frac{1}{R_{q^0 p}^2}, \quad G = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-ik_1 R_{q^0 p})}{R_{q^0 p}}, \\ R_{q^0 p} &= \sqrt{(x^0 - x)^2 + (y^0 - y)^2 + z^{02}}. \end{aligned}$$

Нехай стороннє джерело знаходиться в далекій зоні, тобто  $R_{q^0 p}$ . Поєднаємо початок координат з деякою точкою, що лежить на поверхні  $S_0$  (див. рис. 3). Вираз для відстані  $R_{q^0 p}$  між точкою  $p$ , що належить поверхні  $S_0$ , і точкою  $q^0$ , у якій розташоване стороннє джерело, можна в цьому випадку спростити (рис. 4):

$$R_{q^0 p} = R - \sin \theta_i (x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i).$$

Тоді вирази (21)–(24) матимуть вигляд

$$\tilde{H}_{1x}^B(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 \left[ (\sin \theta_i \cos \varphi_i)^2 - 1 \right], \quad (25)$$

$$\tilde{H}_{1y}^B(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 \sin^2 \theta_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i, \quad (26)$$

$$\hat{H}_{1x}^B(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 \sin^2 \theta_i \cos \varphi_i \sin \varphi_i, \quad (27)$$

$$\hat{H}_{1y}^B(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 \left[ (\sin \theta_i \sin \varphi_i)^2 - 1 \right], \quad (28)$$

$$\text{де } G^0 = \frac{e^{-ik_1 R}}{4\pi R} e^{ik_1 \sin \theta_i (x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}.$$

Тепер для визначення правих частин в інтегральних рівняннях (14) і (15), що є скалярними добутками і  $-\xi \cdot \tilde{H}_1^B(q^0, p)$ , необхідно знайти вектор  $\xi$ . Будемо вимагати такої орієнтації вектора  $\xi$ , щоб у разі перпендикулярної поляризації проекцію вектора  $H(p, t_0)$ , а в разі паралельної поляризації проекцію вектора  $E(p, t_0)$  хвилі, що падає, можна було б подати у вигляді

$$\begin{Bmatrix} H(p, t_0) \\ E(p, t_0) \end{Bmatrix} = (l_x \cdot \cos \varphi_i + l_y \cdot \sin \varphi_i) \cdot H_0 \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ W_1 \end{Bmatrix}$$

Тут позначено  $H(p, t_0)$ ,  $E(p, t_0)$  – миттєві значення векторів напруженості магнітного і електричного нуля;  $H_0 = \frac{k_1 \sin \theta_i}{4\pi \cdot R_{q^0 p} W_1}$ . Тоді в разі перпендикулярної і паралельної поляризації проекція вектора  $\xi$  на площину XOY повинна мати вигляд

$$\xi_{XOY}^\perp = -l_x \cdot \cos \varphi_i - l_y \cdot \sin \varphi_i, \quad \xi_{XOY}^\parallel = -l_x \cdot \sin \varphi_i + l_y \cdot \cos \varphi_i. \quad (29)$$

Задавши вектор  $\xi$  таким чином, отримаємо вирази для правих частин рівнянь (14), (15).

Випадок перпендикулярної поляризації:

$$-\xi \cdot \tilde{H}_1^B(q^0, p) = -2H_0 \cos \varphi_i \cos \theta_i e^{ik_1 \sin \theta_i (x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}, \quad (30)$$

$$-\xi \cdot \hat{H}_1^B(q^0, p) = -2H_0 \sin \varphi_i \cos \theta_i e^{ik_1 \sin \theta_i (x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}. \quad (31)$$

Випадок паралельної поляризації:

$$-\xi \cdot \tilde{H}_1^B(q^0, p) = -2H_0 \sin \varphi_i e^{ik_1 \sin \theta_i (x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}, \quad (32)$$

$$-\xi \cdot \hat{H}_1^B(q^0, p) = 2H_0 \cos \varphi_i e^{ik_1 \sin \theta_i (x \cos \varphi_i + y \sin \varphi_i)}. \quad (33)$$

Тож отримано вирази для правих частин системи скалярних інтегральних рівнянь (14) і (15), що відповідають випадкам збудження мікросмугової решітки

локально плоскою хвилею перпендикулярної і паралельної поляризації.

Оскільки решітка збуджується локально плоскою хвилею, то, як випливає з виразів (30) – (33), елементи решітки збуджуються рівноамплітудно, а зміна фази поля збудження від елемента до елемента описується лінійним законом. Вважаючи в (30) – (31)  $x=Md_1$ ,  $y=Nd_2$ , одержуємо, що осередок решітки з номером  $M$ ,  $N$  збуджується полем  $F \cdot \exp[i(h_1Md_1 + h_2Nd_2)]$ , де  $F$  – комплексна амплітуда поля збудження на осередку з номером  $(0,0)$ ;  $h_1 = k_1 \sin \theta_i \cos \varphi_i$ ,  $h_2 = k_1 \sin \theta_i \sin \varphi_i$ ;  $k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$  – коефіцієнт поширення ЕМХ в об'ємі  $V_1$ ;  $\theta_i$  – кут падіння збуджуючої локально плоскої хвилі, що відлічується від осі  $z$ ;  $\varphi_i$  – кут між площиною падіння і віссю  $x$ , що відлічується в площині  $ХОУ$  (див. рис. 1). Складові вектора напруженості електричного поля, що відшукуються в одному поперечному перетині, відрізняються від складових вектора напруженості електричного поля в іншому поперечному перетині на відстані, кратній періоду структури тільки комплексної постійної:

$$E_{x,y}(x' + Md_1, y' + Nd_2) = E_{x,y}(x', y') \cdot \exp[i(h_1Md_1 + h_2Nd_2)], \quad (34)$$

де  $E_{x,y}(x', y')$  – компоненти дотичної до  $ХОУ$  складової вектора напруженості електричного поля в центральному осередку.

Цей факт відомий в літературі під назвою теореми Флоке [10–13], яка, по суті, є додатком теорії рядів Фур'є для періодичних функцій. Вона дозволяє одержати гармонічне розкладання будь-якої функції, значення якої повторюються періодично з точністю до експоненціального множника. Саме такою функцією описуються напруженості магнітних полів, які відшукуються на елементах нескінченних періодичних решіток. Скориставшись теоремою Флоке, вдається побудувати періодичне рішення рівняння Гельмгольца, що задовольняє періодичні граничні умови. Якщо підставити вираз (34) в (16) та (17), одержимо

$$\int_{S_4} \{E_y(x', y') \cdot K_{11}(x' - x, y' - y) - E_x(x', y') \cdot K_{12}(x' - x, y' - y)\} \cdot dx' dy' = -\xi \hat{H}_1^e(q^0, p), \quad (35)$$

$$\int_{S_1} \{E_y(x', y') \cdot K_{21}(x' - x, y' - y) - E_x(x', y') \cdot K_{22}(x' - x, y' - y)\} \cdot dx' dy' = -\xi \hat{H}_1^e(q^0, p), \quad (36)$$

де праві частини визначаються співвідношеннями (30) – (33).

3.2. Визначення компоненти ядра системи скалярних ІР (35) – (36).

Скориставшись одержаними в [10] співвідношеннями, приведемо вирази, що визначають компоненти ядра системи скалярних ІР (35) – (36):

$$K_{11}(x' - x, y' - y) = \left\{ \left( k_1^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) \frac{G_1^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_1 W_1} + \left( k_2^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) \frac{G_2^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_2 W_2} \right\}, \quad (37)$$

$$K_{12}(x' - x, y' - y) = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \frac{G_1^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_1 W_1} + \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \frac{G_2^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_2 W_2} \right\}, \quad (38)$$

$$K_{21}(x' - x, y' - y) = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \frac{G_1^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_1 W_1} + \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \frac{G_2^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_2 W_2} \right\}, \quad (39)$$

$$K_{22}(x' - x, y' - y) = \left\{ \left( k_1^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) \frac{G_1^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_1 W_1} + \left( k_2^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) \frac{G_2^{AR}(x' - x, y' - y)}{i k_2 W_2} \right\}, \quad (40)$$

де

$$G_1^{AR}(x' - x, y' - y) = \frac{1}{d_1 d_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_{1mn}} \exp[i\alpha_m(x' - x) + i\alpha_n(y' - y)], \quad (41)$$

$$G_2^{AR}(x' - x, y' - y) = \frac{1}{d_1 d_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{cth(\gamma_{2mn} d)}{\gamma_{2mn}} \exp[i\alpha_m(x' - x) + i\alpha_n(y' - y)], \quad (42)$$

$$\alpha_m = \frac{2\pi m}{d_1} + h_1, \quad \alpha_n = \frac{2\pi n}{d_2} + h_2, \quad \gamma_{1mn} = \sqrt{\alpha_m^2 + \alpha_n^2 - k_1^2},$$

$$\gamma_{2mn} = \sqrt{\alpha_m^2 + \alpha_n^2 - k_2^2}. \quad (43)$$

Таким чином, використання умови періодичності дозволило замість періодичної системи апертур розглядати одну центральну апертуру. Наявність оточення з ідентичних МСЕ та його вплив на характеристики центрального елемента решітки враховують функції  $G_1^{AR}(x' - x, y' - y)$ ,  $G_2^{AR}(x' - x, y' - y)$ , що визначаються (41) та (42).

З наведених вище співвідношень можливо отримати поля нескінченних решіток мікросмугових елементів та подати у вигляді подвійних нескінченних рядів по просторових гармоніках системи. Кінцеве число цих гармонік – такі, що поширюються у напрямі осі  $z$  ( $\gamma_{1mn}$  – уявна величина), та нескінченне число гармонік є затухаючими в цьому напрямі ( $\gamma_{1mn}$  – дійсна величина). Перші є швидкими у напрямі осей  $x$  і  $y$ , а другі – повільними в цих напрямках хвилями [9].

#### 4. Чисельна реалізація рішення системи інтегральних рівнянь (СІР)

4.1. Метод моментів рішення системи інтегральних рівнянь.

Інтегральні рівняння електродинаміки рідко мають аналітичне рішення. Число таких рішень надзвичайно мало, тому в більшості випадків доводиться використовувати чисельні методи для розв'язання СІР. Існує декілька методів для вирішення ІР, але в електродинаміці найбільшого поширення набув метод моментів [13, 2], що полягає в тому, що для розкладання невідомої функції вибирається система базисних функцій струмів

(БФС), визначається система пробних функцій (ПФ), береться скалярний добуток кожної пробної функції з лівою та правою частинами ІР, у результаті отримується система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Шляхом рішення цієї системи визначаються коефіцієнти розкладання невідомої функції. Найбільше поширені окремі випадки методу моментів: метод Крилова–Боголюбова (базисні функції – кусково-сталі, пробні – дельта-функції) та метод Галеркіна (однакові базисні і пробні функції). Для чисельного вирішення системи ІР (44) – (46) застосовувався загальний метод Галеркіна:

$$\int_{S_A} \{J_x^M(x', y') K_{11}(q, p) + J_y^M(x', y') K_{12}(q, p)\} dS_q -$$

$$-i 2\pi a \sum_{k=1}^{N_k} \int_{-d}^0 J_{zk}^o(z') K_{13}(x_k, y_k, z'; p) dz' = -\xi \tilde{H}_1^o(q^0, p) \quad (44)$$

$$\int_{S_A} \{J_x^M(x', y') K_{21}(q, p) + J_y^M(x', y') K_{22}(q, p)\} dS_q -$$

$$-i 2\pi a \sum_{k=1}^{N_k} \int_{-d}^0 J_{zk}^o(z') K_{23}(x_k, y_k, z'; p) \cdot dz' = -\xi \tilde{H}_1^o(q^0, p) \quad (45)$$

$$\int_{S_A} \{J_x^M(q) K_{31}(q; x_t, y_t, z) + J_y^M(q) K_{32}(q; x_t, y_t, z)\} dS_q -$$

$$-2\pi a \sum_{k=1}^N \int_{-d}^0 J_k^o(z') K_{33}(x_k, y_k, z'; x_t, y_t, z) dz' = Z_t(z) J_t^o(z) \quad (46)$$

де  $t=1, \dots, N$ ,  $z \in [-d; 0]$ ;  $J_x^M(q)$ ,  $J_y^M(q)$  – складові поверхневої густини магнітного струму аперттури, що визначаються із співвідношень

$$J_x^M(q) = E_y(q), \quad J_y^M(q) = -E_x(q). \quad (47)$$

Інтегральні рівняння (44) і (45) – це покомпонентний запис векторного інтегрального рівняння, що є граничною умовою для магнітного поля в апертурі решітки.

**Вибір базисних і пробних функцій.** Однією з основних проблем при чисельному дослідженні ІР є вибір системи базисних функцій, що апроксимує реальну функцію розподілу струму. Вдалий вибір цієї системи функцій приводить до швидшої збіжності рішення та зменшення обсягу обчислень. Базисні функції повинні відображати характерні особливості поведінки дійсного розподілу струму, зокрема, біля краю МСЕ нормальна до нього складова магнітного струму аперттури повинна прямувати до нуля як корінь квадратний від відстані до краю, а дотична складова – як величина, зворотна кореню квадратному від відстані до краю. Важливе значення при виборі базисних функцій має і можливість обчислення інтегралів в аналітичній формі, а також достатньо простий вид виразів, що отримуються при цьому.

У разі МСЕ довільної форми для перетворення ІР в СЛАР можна скористатися методом кінцевих елементів, запозичивши з нього ідею дискретизації області визначення шуканого струму та кусково-поліноміальної апроксимації. Найбільш простий шлях – це використання при дискретизації елементів трикутної форми і лінійної апроксимації функції, що відшукується в межах трикутників. Проте коли область визначення струму,

який відшукується, можна розбити на прямокутні підобласті, як базисні функції струму зручно вибирати двовимірні функції підобластей [7]. Кожна з цих функцій є добутком трикутних імпульсів уздовж напрямку протікання струму на прямокутні в перпендикулярному напрямі. У результаті отримується розподіл базисних функцій, що перекриваються, для ортогональних складових струму (рис. 5) Основою базису, показаного на рис. 5, є те, що при його застосуванні вдасться одержати подання струму не тільки на МСЕ довільної форми, але і врахувати особливості поля на краях. Застосування цього базису для струму дозволяє у векторному ІР (35) – (36) позбавитися неінтегрованої особливості ядра, що виникає при внесенні диференціального оператора під знак суми у виразах (37) – (40). Використання такого подання струму, або розкладання по БФС з кінцевою потужністю, і формальне застосування методу моментів дозволяє шляхом інтеграції по частинах перенести операцію диференціювання з ядра ІР на струм, який відшукується.

Отже, виконаємо розкладання функцій розподілу струмів, що відшукуються як системні функції, кожна з яких є добутком кусково-трикутної функції  $T_m(t)$  уздовж напрямку протікання струму та кусково-постійної функції  $P_m(t)$  в перпендикулярному напрямі.

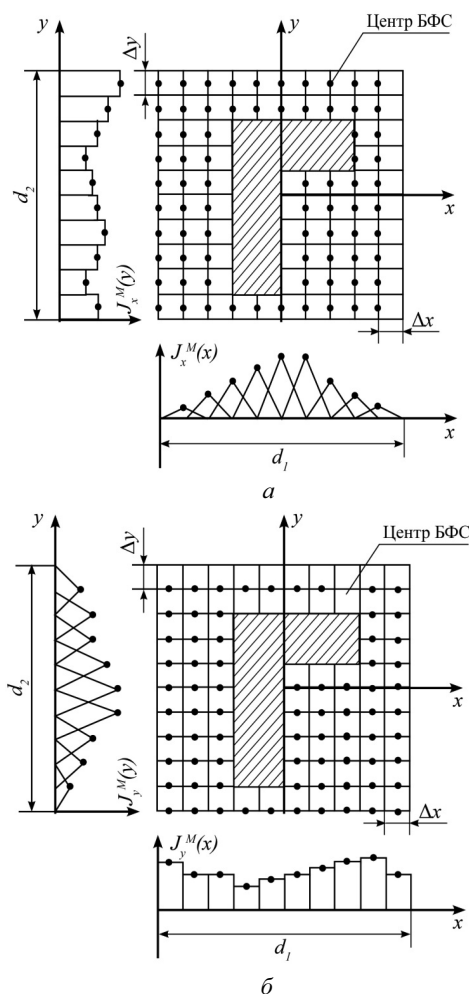


Рис. 5. Розташування магнітного струму аперттури по базисних функціях



$$J_x^M(x', y') = \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} \cdot T_i(x') \cdot P_j(y'), \quad (48)$$

$$J_y^M(x', y') = \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} B_{ij} \cdot T_j(y') \cdot P_i(x'), \quad (49)$$

де

$$P_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \in (t_i, t_{i+1}); \\ 0, & \text{при } t \notin (t_i, t_{i+1}), \end{cases} \quad (50)$$

$$T_i(t) = \frac{(t - t_{i-1})}{\Delta t} \text{ при } t \in (t_{i-1}, t_i);$$

$$T_i(t) = \frac{(t_{i+1} - t)}{\Delta t} \text{ при } t \in (t_i, t_{i+1}); \quad (51)$$

$$T_i(t) = 0 \text{ при } t \notin (t_{i-1}, t_{i+1}).$$

Тут позначено:  $A_{ij}$  і  $B_{ij}$  – коефіцієнти розкладання магнітного струму, що необхідно визначити,  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  – інтервал розбиття ділянки інтегрування по відповідній координаті.

Помітимо, що, вибираючи нерівномірну сітку розбиття апертури, тобто змінний інтервал  $\Delta t$ , можна використовувати невелике число базисних функцій і водночас добре апроксимувати магнітний струм поблизу країв МСЕ. Для цього необхідно зменшувати  $\Delta t$  при наближенні до краю МСЕ. Тим самим можна достатньо точно врахувати особливості розподілу магнітного струму апертури біля країв МСЕ. При цьому число рівнянь у СЛАР зростає трохи.

Функцію розподілу поверхневої густини електричного струму  $k$ -го імпедансного штиря  $J_{zk}^s(z')$  розкладемо за системою кусково-трикутної функції:

$$J_{zk}^s(z') = \sum_{i=0}^{L_z+1} D_{ki} T_i(z' + d), \quad (52)$$

де  $D_{ki}$  – коефіцієнти розкладання струму, що відшукуються.

У виразі (52) крайні базисні функції з номерами  $l = 0$  і  $l = L_z + 1$  є кусково-трапецеїдальними, а в середині інтервалу – кусково-лінійними.

4.2. Визначення розрахункових характеристик розсіювання.

Вторинне поле періодичної структури, що збуджується плоскою хвилею, являє собою нескінченний набір плоских хвиль. Серед них тільки кінцеве число хвиль є такими, що поширюються, інші швидко затухають. В однохвильовому режимі поширюватиметься тільки нульова просторова гармоніка ( $m = 0, n = 0$ ).

Практичний інтерес викликає інформація про поле розсіювання в далекій зоні. Очевидно, що це поле є набором плоских хвиль, які поширюються. В однохвильовому діапазоні з усього набору залишається тільки нульова просторова гармоніка. Оскільки амплітуда цієї гармоніки дуже залежить від поляризації падаючого поля і оскільки падаюча хвиля однієї поляризації (вертикальної або горизонтальної) загалом збуджує відбиті хвилі обох поляризацій, то поле як падаюче, так і відбите, зручно подати у вигляді суми двох складових. Одна з цих складових має електричне поле, вектор напруженості якого перпендикулярний площині падіння (горизонтальна поляризація).

Уведемо лінійний ортогональний поляризаційний базис ( $i_1, i_2$ ) так, щоб орт  $i_1$  цього базису лежав у площині падіння, а орт  $i_2$  був перпендикулярним їй. Проектуючи цей базис на площину решітки, отримаємо

$$i_1' = i_x \cos \varphi_i + i_y \sin \varphi_i, \quad i_2' = i_x \sin \varphi_i - i_y \cos \varphi_i, \quad (53)$$

де  $i_1'$  і  $i_2'$  – проекції векторів  $i_1$  і  $i_2$  на площину XOY.

Визначимо елементи ПМР як відношення комплексних амплітуд ортогонально поляризованих компонент векторів напруженостей електричних полів нульової просторової гармоніки відбитої і падаючої хвилі:

$$S_{11} = \frac{E_{(0,0)}^{S(\parallel)} i_1'}{E_{(0,0)}^{J(\parallel)} i_1'} \bigg|_{z=0}; \quad S_{12} = \frac{E_{(0,0)}^{S(\parallel)} i_2'}{E_{(0,0)}^{J(\parallel)} i_2'} \bigg|_{z=0};$$

$$S_{21} = \frac{E_{(0,0)}^{S(\perp)} i_2'}{E_{(0,0)}^{J(\perp)} i_1'} \bigg|_{z=0}; \quad S_{22} = \frac{E_{(0,0)}^{S(\perp)} i_1'}{E_{(0,0)}^{J(\perp)} i_2'} \bigg|_{z=0}, \quad (54)$$

де нарядкові індекси "i" і "s" відносяться до полів падаючої і відбитої хвиль відповідно, а індекси "(||)" і "(⊥)" означають паралельну і перпендикулярну поляризації відповідно; підрядковий індекс (0,0) означає, що у співвідношення (54) входить нульова просторова гармоніка поля.

Таким чином, елементи ПМР  $S_{11}$  і  $S_{22}$  вводяться як коефіцієнти відбиття по нульовій просторовій гармоніці на узгоджених поляризаціях, а елементи  $S_{21}$  і  $S_{12}$  – як коефіцієнти крос-поляризації.

Виразимо елементи ПМР через коефіцієнти розкладання магнітного струму апертури. Для цього розкладемо функції  $J_x^M(x', y')$  і  $J_y^M(x', y')$  у подвійні ряди Фур'є:

$$J_{\{x\}}^M(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{\{x\}}^{Mmn} \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{mx}{d_1} + \frac{ny}{d_2} \right) \right]. \quad (55)$$

Вираз (55) є скороченою формою запису одразу двох розкладань як для  $J_x^M(x', y')$ , так і для  $J_y^M(x', y')$ . Вираз для коефіцієнтів розкладання  $J_{xmn}^M$  і  $J_{ymn}^M$  можна подати у вигляді

$$J_{xmn}^M = \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{xmn} e_{mn}(x_i, y_j), \quad (56)$$

$$J_{ymn}^M = \sum_{i=1}^{L_x} \sum_{j=2}^{L_y} A_{ij} R_{ymn} e_{mn}(x_i, y_j). \quad (57)$$

Тут множники при невідомих комплексних амплітудах БФС  $i$ , а також визначені в (47).

Оскільки у виразах (54), що визначають елементи ПМР, з усього спектра просторових частот відбитого поля виділяється лише нульова просторова гармоніка, то, залишаючи в (55) гармоніку  $m = 0, n = 0$ , враховуючи (53) і співвідношення, що визначають поверхневі магнітні струми

$$J_{1,2,3y}^M(q) = E_{1,2,3y}(q), \quad J_{1,2,3x}^M(q) = -E_{1,2,3x}(q) \quad \text{при } q \in S_{0,1,2,3};$$

отримаємо

$$S_{11} = -1 + \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{x00} - \cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{y00}, \quad (58)$$

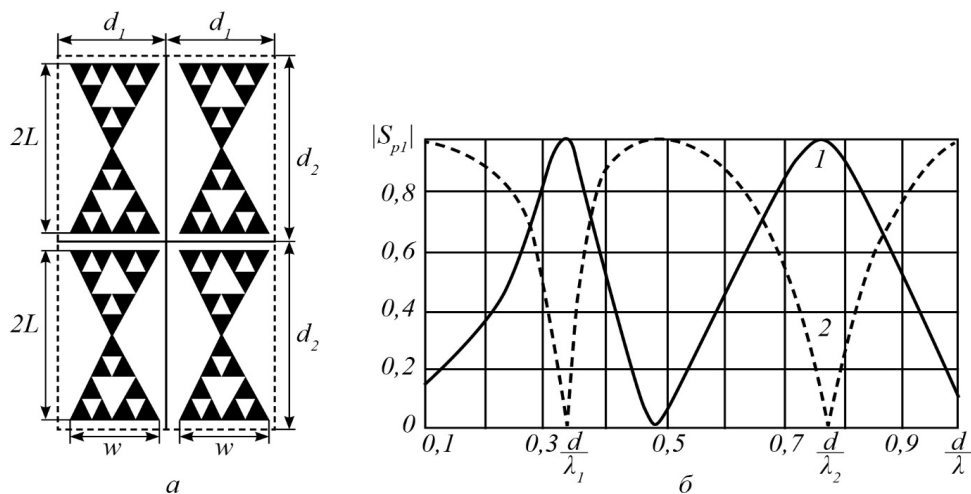


Рис. 6. Фракталоподібна ЧВП на основі друкованих надпровідних вібраторів с трикутними плечима (трикутник Серпінського 2-го покоління):

$$S_{12} = \frac{\sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{x00} - \cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{y00}}{\sin \varphi_i E_x^i - \cos \varphi_i E_y^i}, \quad (59)$$

$$S_{21} = -\frac{\cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{x00} - \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{y00}}{\cos \varphi_i E_x^i - \sin \varphi_i E_y^i}, \quad (60)$$

$$S_{22} = -1 - \frac{\cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{x00} - \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} R_{y00}}{\sin \varphi_i E_x^i - \cos \varphi_i E_y^i}. \quad (61)$$

Підставляючи у співвідношення (58) – (61) вирази для  $E_{x,y}^i$  і  $R_{x,y00}$ , отримаємо розрахункові формули для елементів ПМР:

$$\begin{aligned} S_{11} &= -1 + \tau \frac{\cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} - \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij}}{\cos \theta_i}; \\ S_{12} &= -\tau \left( \cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} - \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} \right); \\ S_{21} &= \frac{-\tau}{\cos \theta_i} \left( \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} + \cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} \right); \\ S_{22} &= -1 - \tau \left( \sin \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} + \cos \varphi_i \sum_{i=2}^{L_x} \sum_{j=1}^{L_y} A_{ij} \right), \end{aligned} \quad (62)$$

де  $\tau = \frac{\Delta x \Delta y}{dxdy}$ ,  $\Delta x$  і  $\Delta y$  – інтервали розбиття аперттури (частини поверхні одиничного осередку решіток, вільних від друкованих елементів) уздовж осей  $x$  і  $y$  відповідно. Таким чином, отримані вирази для елементів ПМР  $\|S\|$  через коефіцієнти розкладань (55) поверхневого магнітного струму аперттури.

Припущення про періодичність решітки дає можливість за допомогою розглянутої математичної моделі аналізувати як друковану решітку з елементами складної форми, так і багаточастотні решітки друкованих елементів. У даному випадку являє інтерес розгляд друкованої

решітка з елементами складної форми. Нижче аналізуються друковані антенні решітки відбиваючого типу, елементи яких мають форму геометричних фракталів.

4.3. *Результати чисельного дослідження частотно-вибіркових поверхонь з фрактальних надпровідних елементів.*

Відомо, що на основі таких фрактальних ВАР можна побудувати багаточастотні ЧВП. Зокрема, в [14] розглянута можливість побудови ЧВП з фрактальних елементів у вигляді "трикутника Серпінського", а в [15] розглянута ЧВП з елементами типу "згорнутий квадрат".

Проведемо чисельне дослідження характеристик розсіяння надпровідної ЧВП фрактальної форми.

Нині відомі два основні способи переводу частотно-вибіркових поверхонь у багаточастотний режим роботи: по-перше, побудова ЧВП у вигляді багаточастотних решіток пластин або апертур, по-друге, застосування ЧВП з елементами складної форми. У кожному з цих випадків при електродинамічному моделюванні таких ЧВП вимагається вирішувати таку граничну задачу.

Як перший приклад розглянемо завдання дифракції для періодичної решітки, складеної з фрактальних вібраторів. Вібратори мають трикутні плечі, кожне з яких має вигляд "трикутника Серпінського" [16]. Для отримання цього фрактала використовується такий алгоритм: береться надпровідна пластина у формі трикутника, середини сторін якого виступають вершинами нового трикутника, який видаляється з початкового. Після цього залишаються три трикутники, розмір кожного з яких у два рази менше розміру початкового трикутника. Далі процес видалення надпровідних поверхонь з трикутних елементів, що залишилися, повторюється аналогічним чином. Після  $n$ -го кроку буде сформований фрактальний елемент  $n$ -го покоління.

На рис. 6, а показаний одиничний осередок періодичної решітки, складеної з таких друкованих вібраторів.

Плече кожного з вібраторів є «трикутником Серпінського» 2-го покоління. Як видно з рисунка, фрактальний елемент є самоподібною структурою, в якій кожен

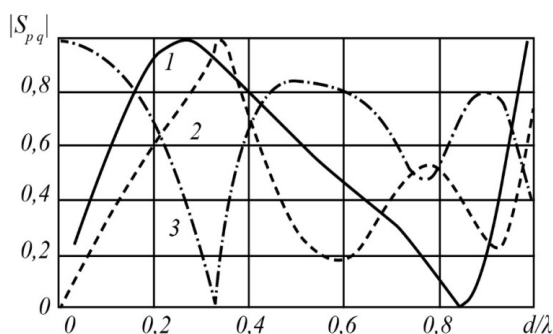


Рис. 7. ЧХ елементів ПМР решітки

трикутний фрагмент є копією в зменшеному масштабі всієї фрактальної структури в цілому.

На рис. 6, а позначено:  $L = 7$  мм – довжина плеча вібратора;  $W = 13$  мм – основа трикутника;  $d_1 = d_2 = d = 15$  мм – розміри одиничного осередку решітки. ЧВП збуджується плоскою лінійно-поляризованою електромагнітною хвилею (ЕМХ), що падає по нормалі, вектор поляризації якої орієнтований уздовж осей друкованих вібраторів (орт  $i_1$  вибраного поляризаційного базису (ПБ)). На рис. 6, б зображені розрахункові частотні характеристики (ЧХ) коефіцієнта віддзеркалення (КВ) ЕМХ крізь таку фрактальну ЧВП на погодженій поляризації (крива 1) і коефіцієнта проходження (крива 2) (модулі елементів поляризаційної матриці розсіювання  $|S_{11}|$  і  $|S_{31}|$ , відповідно). Як видно з графіків, в однохвильовому діапазоні решітки (ОДР) існує два резонанси повного відображення при  $2L/\lambda_1 = 0,32$ ,  $2L/\lambda_2 = 0,72$  і один резонанс повного проходження при  $2L/\lambda_0 = 0,45$ . У цьому прикладі, коли вібратори розташовані у вузлах сітки з прямокутним осередком, відношення верхньої до нижньої частоти загородження складає 2,25. Випадок, коли подібні фрактальні вібратори розташовуються у вузлах сітки з трикутним осередком, розглянутий в [2], при цьому  $\zeta=2,9$ . Таким чином, вібраторна ЧВП, складена з фрактальних елементів 2-го покоління, має властивість двочастотного загородження в однохвильовому діапазоні решітки. Результати чисельного дослідження (програма AWR) поляризаційних властивостей вищеописаною вібраторною ЧВП зображені на рис. 7, де для випадку нормального падіння показані: крива 1 – ЧХ решіток на перпендикулярній поляризації  $|S_{22}(d/\lambda)|$  (орт  $i_2$  вибраного поляризаційного базису, перпендикулярний площині падіння, що проходить через вісь фрактального вібратора); криві 2 і 3 – ЧХ  $|S_{11}(d/\lambda)|$  та  $|S_{31}(d/\lambda)|$  у поляризаційному базисі, поверненому на кут  $45^\circ$  відносно осей фрактальних вібраторів.

Як видно з графіків, досліджувана вібраторна ЧВП є поляризаційно-селективною. Дійсно, на ортогональній поляризації (крива 1) у ВДР залишається тільки один довгохвильовий резонанс повного відображення, при цьому резонансна довжина хвилі  $\lambda_r$  виявляється приблизно на 20% більше  $\lambda_1$ . Що стосується короткохвильового резонансу, який спостерігався на довжині хвилі  $\lambda_2$ , то він зміщується у багатохвильову область. Поворот поляризаційного базису (ПБ) практично не впливає на

довгохвильовий резонанс, але погіршує її властивості, що загороджують, в короткохвильовій області ВДР (максимальне значення  $K$  (крива 2) близько  $\lambda_2$  знижується майже на 1,5 дБ). Крім того, при повороті ПБ погіршуються і пропускні властивості ЧВП біля резонансу повного проходження, що спостерігається на довжині хвилі  $\lambda_0$  (рис. 7). Видно, що максимальне значення КП (крива 3) в діапазоні довжин хвиль  $\lambda_2 < \lambda < \lambda_1$  знижується на 1,5 дБ.

Безперечний інтерес становить дослідження поведінки характеристик віддзеркалення (ХВ) фрактальних ЧВП у секторі кутів падіння. Річ у тому, що ЧВП у багаточастотній ДА, як правило, знаходиться поблизу опромінювача, і тому ЕМХ, що збуджується, не можна вважати плоскою. У цьому випадку ЕМХ, що збуджується, можна представити у вигляді набору плоских хвиль, що падають на ЧВП під різними кутами. Результати чисельного дослідження вищеописаних решіток у секторі кутів падіння зображені на рис. 8, де показані графіки залежностей  $|S_{11}(d/\lambda)|$  при різних кутах падіння  $\theta$  в площині, що проходить через вісь фрактального вібратора. На рис. 8 крива 1 відповідає  $\theta = 0^\circ$ , крива 2 –  $\theta = 30^\circ$  і крива 3 –  $\theta = 60^\circ$ . Як видно з графіків, зміна кута падіння практично не впливає на відбивні властивості ЧВП в області довгохвильового резонансу повного віддзеркалення, але істотно впливає на короткохвильовий резонанс, а саме, по-перше, відбувається зміщення резонансної кривої в довгохвильову область тим більше, чим більше кут  $\theta$ , по-друге, резонансне значення знижується в середньому на 1 дБ.

Що стосується резонансу повного проходження, то зі збільшенням  $\theta$  він також зміщується в довгохвильову область. Крім того, характерною особливістю похилого падіння є поява в ЧХ фрактальної ЧВП додаткових високодобротних резонансів повного віддзеркалення, описаних у [17].

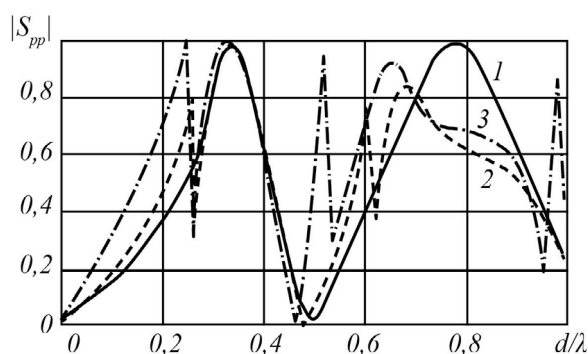


Рис. 8. ЧХ елементів ПМР решітки

Технологія виробництва друкованих схем, яка втілена при побудові ЧВП, а також прагнення запобігти негативному впливу довкілля (наприклад, гідрометеорів) на ЧВП вимагають урахування впливу діелектричних шарів підкладки та укріття на характеристики решітки. Результати чисельного дослідження впливу на характеристики відображення ЧВП діелектричного шару показані на рис. 9. Розглянутий випадок нормального

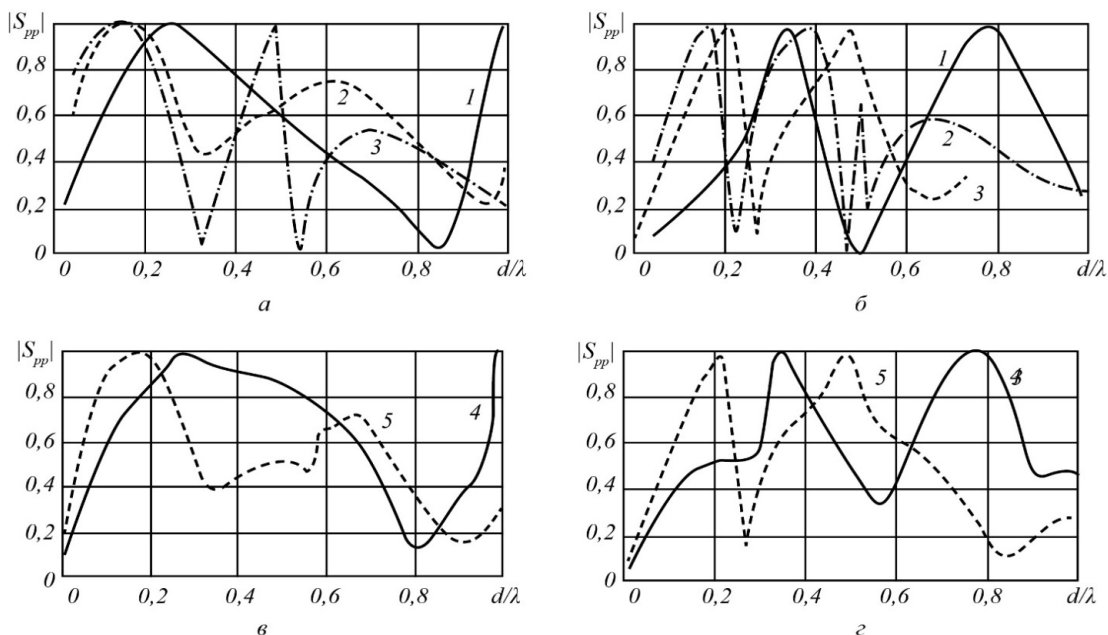


Рис. 9. ЧХ елементів ПМР металево-діелектричних решіток фрактальних вібраторів

падіння плоскої ЕМХ, яка збуджує ЧВП. На рис. 9, а зображені частотні залежності коефіцієнта відбиття ЧВП з фрактальних трикутних вібраторів  $|S_{32}(d/\lambda)|$  на перпендикулярній поляризації, а на рис. 9, б – КВ  $|S_{11}(d/\lambda)|$  на паралельній поляризації. Однорідний діелектричний шар має товщину  $h = d/4$  і відносну діелектричну проникність  $\epsilon_r$ . Частотні характеристики, зображені кривими 1, розраховані при  $\epsilon_r = 1$ . Графіки, позначені цифрами 2 і 3, розраховані для  $\epsilon_r = 4$ . При цьому криві 2 відповідають тому випадку, коли решітки фрактальних вібраторів поміщені на діелектричному шарі, що виконує роль підкладки, а криві 3 – коли решітки знаходяться всередині шару діелектрика, тобто мають як підкладку, так і укриття. Бачимо, що введення діелектричного шару привело до зміщення резонансних кривих в довгохвильову область, причому на паралельній поляризації це зміщення значніше, ніж на перпендикулярній. Так, у присутності діелектричного шару довжина хвилі, при якій спостерігається резонанс повного віддзеркалення на перпендикулярній поляризації, в середньому збільшилася на 75%. У той же час, на паралельній поляризації резонансні довжини хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  зросли приблизно на 60% у разі, коли решітки розташовані поза шаром діелектрика, і приблизно на 100%, коли решітки знаходяться в шарі. Як видно з графіків, зміщення ЧХ супроводжується їх стискуванням, що більшою мірою проявляється у тому випадку, коли решітка знаходиться усередині шару діелектрика. Мабуть це відбувається через зміщення межі ВДР у довгохвильову область.

Дійсно, при нормальному падінні на решітку, яка вміщена в діелектричний шар, хвилі вищих дифракційних порядків з'являються за умови  $d = \lambda_{\epsilon}$ , де  $\lambda_{\epsilon}$  – довжина хвилі в шарі діелектрика. Помітимо, що в даному прикладі на межі ВДР діелектричний шар стає чвертьхвильовим. При такій товщині шару допустимо вважати, що  $\lambda_{\epsilon} \approx \lambda \sqrt{\epsilon_r}$ . Таким чином, у присутності одно-

рідного діелектричного шару відбувається стискування ВДР (у даному прикладі коефіцієнт стискування приблизно дорівнює 2). Отже, звужується діапазон робочих частот ЧВП, що в цілому може призвести до погіршення характеристик антенних систем, в яких застосовуються ЧВП [15].

Відзначеного недоліку позбавлена ЧВП у вигляді фрактальних решіток на неоднорідній діелектричній підкладці. Як приклад розглянемо структуру, в якій проникність діелектричних шарів лінійно міняється по товщині. Як і в попередньому прикладі, розглядається випадок нормального падіння ЧВП, що збуджується плоскою ЕМХ. На рис. 9, в показані частотні залежності КВ (коефіцієнта відбиття) вищеописаною фрактальною ЧВП  $|S_{32}(d/\lambda)|$  на перпендикулярній поляризації, а на рис. 9, г – коефіцієнт відбиття ЧВП  $|S_{11}(d/\lambda)|$  на паралельній поляризації. Товщина неоднорідного діелектричного шару  $h = d/2$ . Відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r$  по товщині шару лінійно змінюється від 1 до 4. Графіки ЧХ, позначені цифрою 4, відповідають випадку розташування фрактальної решітки на неоднорідному діелектричному шарі, що виконує роль підкладки (випадок 1); а криві 5 – випадку, коли решітка знаходиться всередині шару діелектрика, тобто має як підкладку, так і укриття (випадок 2). Бачимо, що в першому випадку введення неоднорідного діелектричного шару не привело до зміщення резонансних кривих і стисканню ЧХ. Ці ефекти спостерігаються тільки в другому випадку, але, на відміну від попереднього прикладу, коли фрактальні решітка розташовувалася всередині однорідного діелектричного шару, тепер їх прояв не такий значний. Так, у присутності неоднорідного діелектричного шару довжина хвилі, при якій спостерігається резонанс повного відбиття на перпендикулярній поляризації, збільшилася приблизно на 50% проти 75% у разі однорідного шару діелектрика. На паралельній поляризації резонансні довжини хвиль

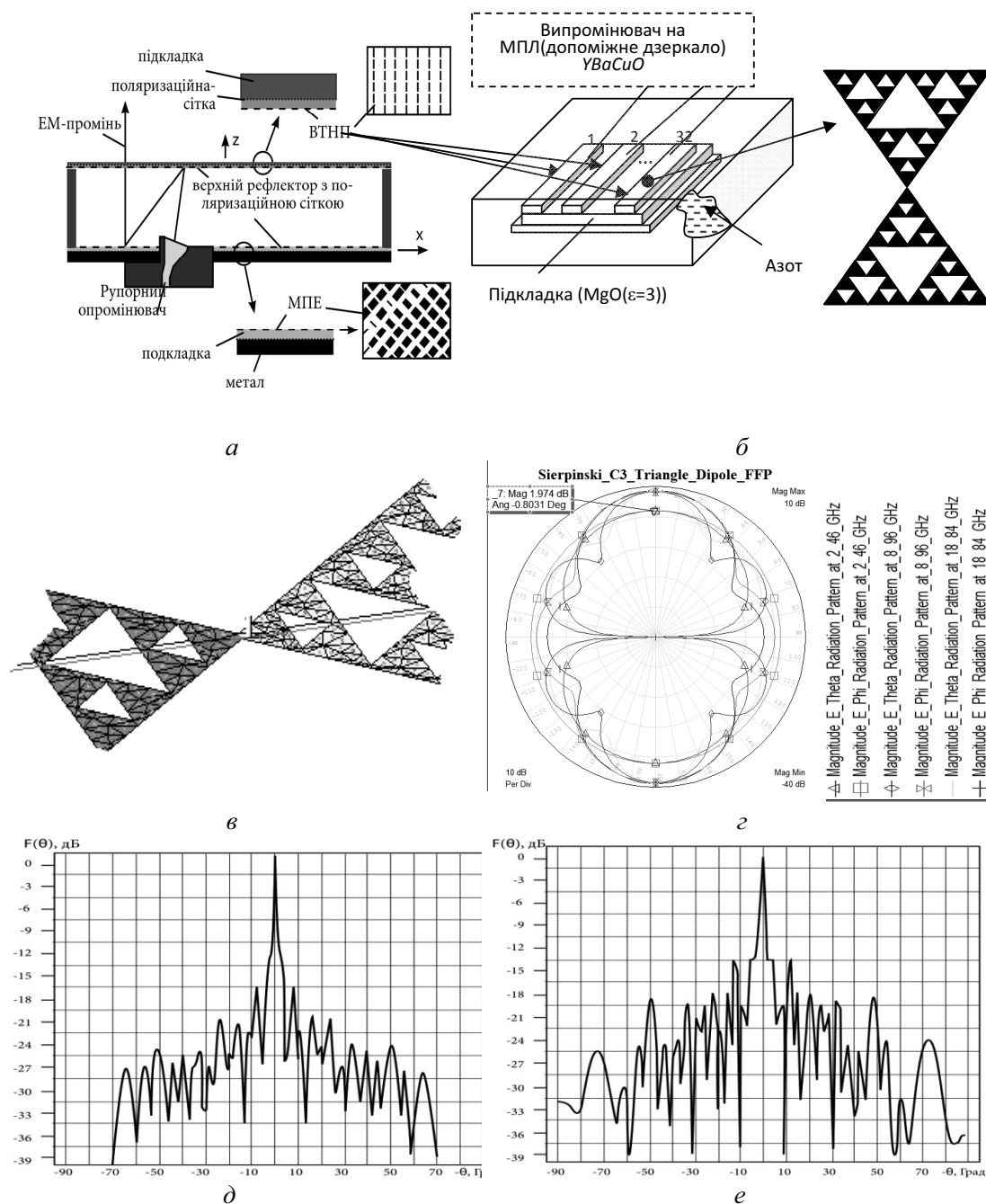


Рис. 10. Структура дводзеркальної антени з плоским фазокорегуючим твіст-рефлектором на основі мікросмугової відбиваючої надпровідної антенної решітки на основі друкованих елементів з «внутрішнім» живленням та результати моделювання:

а – структура ДДЗА; б – структура решітки допоміжного дзеркала; в – розподіл струмів на ВТСП вібраторі; г – діаграма спрямованості, площина  $xOz$ ; д – діаграма спрямованості, площина  $yOz$

решітки в неоднорідному діелектричному шарі  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  зросли приблизно на 60% проти 100% у разі однорідного шару діелектрика. Слід зауважити, що при введенні діелектричного шару до складу ЧП відбувається незначне погіршення її пропускних властивостей у смузі прозорості решітки: максимальне значення КП у діапазоні довжин хвиль  $\lambda_2 < \lambda < \lambda_1$  знижується у випадках 1 і 2 приблизно на 0,5 дБ і 0,2 дБ відповідно. Крім того, відбувається зміщення частоти максимальної прозорості ЧВП відносно частоти повного проходження ЕМХ крізь решітку.

**Висновки.** Структура надпровідної фрактальної дводзеркальної антени та результатів моделювання її діаграми спрямованості в програмі, а також струмів і діаграми спрямованості надпровідних мікросмугових елементів показана на рис. 10. Результати підтвердили вірогідність математичного опису, який запропоновано в статті електромагнітної моделі надпровідної дводзеркальної антени.

У результаті електромагнітного моделювання запропонована дводзеркальна захисна антена яка має такі особливості:

значно збільшено ККД антени надпровідної решітки – 60% (на МПЛ з мідних плівок ККД антени лише 5%) [18];

мала площа, яка зайнята випромінювачами дозволяє знизити радіолокаційну помітність такої ФАР (один ВТСП-вібратор займає площу  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup> при  $F=2,46$  ГГц);

слабка кутова чутливість ЧХ фрактальних ВТСП випромінювачів дозволяє здійснювати неспотворене просторове сканування променем решітки;

вібраторна решітка, складена з фрактальних елементів 2-го покоління та 3-го покоління має властивість 2- та 3-частотного випромінювача відповідно;

за наявності діелектричного шару зменшений взаємний вплив вібраторів решітки;

швидкість спрацьовування (опір збільшується на 3–4 порядки) надпровідних елементів решітки при дії електромагнітного удару складає менше 1 пс [19].

Таким чином, запропоновану дводзеркальну антену [19] можливо використовувати як захисну від електромагнітного ураження підключеного до неї приймального тракту радіотехнічної системи, тому що виявлені її амплітудні, частотні та поляризаційні обмежувальні властивості.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Chen W. C., Kong J. A. Analysis of a circular microstrip disk antenna with a thick dielectric substrate // IEEE Trans. 1981. Vol. AP-29, N 1. P. 68–76.
- Liu C. C., Shmoys J., Hessel A., Hafiling J. D., Usoff J. M. Plane wave reflection from microstrip-patch arrays. Theory and experiment // IEEE Trans, on AP. 1985. Vol. AP-33, N4. P. 426–435.
- Шестопапов В. П., Литвиненко Л. П., Масалов С. А., Сологуб В. Г. Дифракция волн на решетках. Харьков : Изд-во Харьковского ун-та, 1973. 278 с.
- Шестопапов В. П. Метод задачи Римана–Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн. Харьков : Изд-во Харьковского ун-та, 1971. 400 с.
- Кравченко В. Ф., Лабунько О. С., Лерер А. М., Синявский Г. П. Вычислительные методы в современной радиофизике / под ред. В. Ф. Кравченко. М. : Физматлит, 2009. 464 с.
- Филиппов В. С. Краевые волны в конечных антенных решетках // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28, № 2. С. 61–72.
- Шестопапов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Дифракционные решетки. К. : Наук. думка, 1986. 232 с. (Резонансное рассеяние волн. Т. 1).
- Васильев Е. И., Ильинский А. С., Свешников А. Р. Численные методы решения задач дифракции на локальных неоднородностях // Вычислительные методы и программирование. М. : МГУ, 1975. Вып. 24. С. 3–13.
- Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн. М. : Радио и связь, 2000.
- Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. М. : Мир, 1974. 456 с.
- Бриллюэн Л., Породи М. Распространение волн в периодических структурах : пер. с франц. / под ред. П. А. Разина. М. : Иностран. лит-ра, 1959.
- Тараненко З. И., Трохименко Я. К. Замедляющие системы. К., 1965.
- Bailey M. C., Deshpande M. D. Integral equation formulation of microstrip antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1982. V. AP-30, № 4. P. 651–656.
- Puente C., Romeu J., Pous R., Cardama A. On the behavior of the Sierpinski multiband antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. AP-46 (4). P. 517–524.
- Khaikin M., Yakovlev S., Kazarinov A., Karavaev D., Rybakov Yu. Instrumental characteristics of Multibeam Solar Radio Telescope // 3-d ESA Workshop on MM-wave Technology and Applications. Espoo, Finland, May 2003. P. 425–430.
- Касьянов А. О. Разработка многофункциональных антенных решёток систем управления воздушным, морским и наземным транспортом // Иллюстрированная брошюра по итогам подпрограммы 205 - “Транспорт” за 2001–2002 годы. М. : МАИ (ГТУ), 2003.
- Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. Ведение в теорию. СПб., 2001. 246 с.
18. Патент на винахід № 17325. МПК 5 H01Q 13/00-13/28 / Фик О. І. Заявл. № u 200603771 від 6.04.2006.

**Рецензент О. П. Кондратенко**, д-р техн. наук, проф.  
(Національна академія Національної гвардії України)

УДК 623.746.2

**С. Д. ВОЙТЕНКО,***кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,***О. В. ЖОЛОБОВ,** *кандидат технічних наук**(Національний авіаційний університет)*

## Обґрунтування функціональної структури перспективного підвісного контейнера оптико-електронної розвідки

*Розглянуто досвід використання підвісних контейнерів оптико-електронної розвідки бойових літаків провідних країн. Визначено актуальність розробки, придбання контейнерів для Збройних Сил України. Побудована функціональна схема перспективного контейнера для потреб Збройних Сил України.*

*Ключові слова: підвісний контейнер, оптико-електронна розвідка, оптичний діапазон, інфрачервоний діапазон.*

*Рассмотрен опыт применения подвесных контейнеров оптико-электронной разведки боевых самолетов ведущих стран. Определена актуальность разработки, закупки контейнеров для Вооруженных Сил Украины. Построена функциональная схема перспективного контейнера для нужд Вооруженных Сил Украины.*

*Ключевые слова: подвесной контейнер, оптико-электронная разведка, оптический диапазон, инфракрасный диапазон.*

Західні військові фахівці розглядають можливість відмови від традиційних засобів повітряної розвідки – спеціалізованих літаків-розвідників – на користь застосування для бойових літаків підвісних контейнерів з використанням оптико-електронних сенсорів, цифрової обробки і передачі відеоінформації. Сучасні контейнери оптико-електронної розвідки є, зазвичай, цілодобовими, універсальними для різних типів тактичних літаків та здатними виконувати завдання повітряної розвідки в широкому діапазоні висот та швидкостей літака-носія.

Досвід проведення антитерористичної операції свідчить про необхідність підвищення ефективності засобів повітряної розвідки, одним з шляхів рішення цієї задачі може стати оснащення літаків Збройних Сил України підвісними контейнерами із сучасним розвідувальним устаткуванням. На теперішній час Командування Повітряних Сил Збройних Сил України найдоцільнішим вважає роботи з розробки (закупівлі) універсальних контейнерів оптико-електронної розвідки та оснащення (адаптації) ними літаків Су-27, МиГ-29, Су-24М та Су-25 що дозволить вести повітряну розвідку силами підрозділів бомбардувальної, винищувальної, штурмової авіації в тактичній та оперативнотактичній глибині [1].

У рамках цієї статті автори на основі аналізу досвіду застосування та характеристик закордонних розвідувальних контейнерів роблять спробу обґрунтувати технічний обрис перспективного зразка контейнера для потреб Збройних Сил України шляхом побудови його функціональної схеми.

Провідне положення на цьому напрямі займають військово-повітряні сили (ВПС) Франції. Розроблений компанією Thales контейнер AEROS Reco-NG став невід'ємною частиною стандарту F3 для винищувачів «Rafale» і «Міраж-2000» та активно використовується в конфліктах в Афганістані і Лівії (рис. 1).



Рис. 1. «Rafale» з AEROS Reco-NG та дводіапазонний сенсор

Повністю цифровий AEROSReco-NG завдяки наявності власної інерційної системи працює автономно, незалежно від обладнання літака та режиму роботи (за часом, за охопленням зони спостереження місцевості). Система автоматичного управління контейнера забезпечує горизонтальний огляд та фотографування на висотах до 60 м при будь-яких швидкостях польоту. Як, тільки знімки зроблені, вони автоматично накладаються на цифрові моделі рельєфу з географічною прив'язкою, що завантажені на жорсткій диск контейнера (накопичувач цифрових даних) при підготовці до польоту. При обробці отримана мозаїка зображень (рис. 2) перетворюється на детальні знімки об'єктів та цифрові карти місцевості з визначеними цілями. У режимі відео, вимірюючи зміщення послідовних знімків, апаратура спроможна оцінити швидкість рухомого об'єкта. Зображення зберігаються на накопичувачі цифрових даних, вони можуть бути передані високошвидкісним каналом зв'язку на приймальну станцію та оброблені в реальному масштабі часу [2].

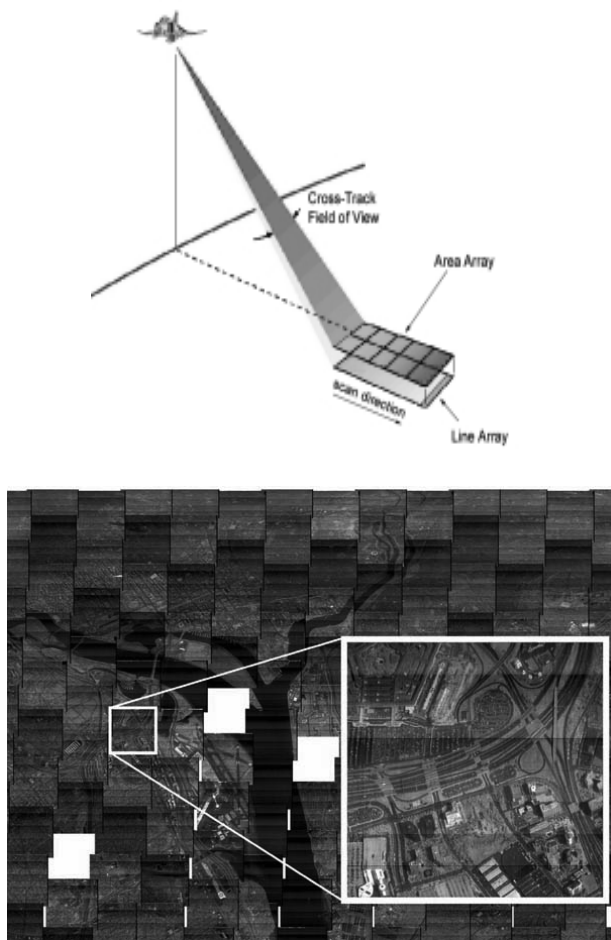


Рис. 2. Мозаїка зображень – цифрові дані

Для ВПС Великобританії джерелами видової інформації при проведенні бойових операцій на Близькому Сході та в Афганістані стали два типи підвісних контейнерів: JRP (Joint Reconnaissance Pod), який використовувався літаками безпосередньої підтримки GR7 «Harrier», і RAPTOR (Reconnaissance Airborne Pod for Tornado) для ударних літаків GR 4a «Tornado» (рис. 3).

Система JRP розроблена на базі контейнерної оптико-електронної системи EO GP-1, має шину зв'язку із системами літака MIL-STD-1553, що дозволяє вносити координати, визначені за допомогою супутникової системи GPS, в розвідувальне відеозображення.



Рис. 3. Контейнер RAPTOR

RAPTOR – дистанційна контейнерна система передбачає двосмуговий режим роботи, здатна функціонувати одночасно у візуальному і інфрачервоному діапазонах частот. Упізнання цілей вдень/вночі у візуальному спектрі робиться на відстанях до 72 км, в інфрачервоному – до 36 км. Система використовує дводіапазонний оптико-електронний /інфрачервоний сенсор DB-110 компанії Raytheon, сконструйований для ведення розвідки на великих висотах і великих (безпечних відносно дії ППО) відстанях. Маючи масу трохи менше 1 т, контейнер RAPTOR підвішується на лівому пілоні під фюзеляжем літака GR 4/4A «Tornado», є, по суті, автономною системою, не повністю інтегрованою з авіонікою літака. Видові оптико-електронні системи можуть «висвічувати» деталі такі, як, наприклад, танкові колії, які не завжди видно на звичайних розвідувальних знімках, забезпечити кращий перегляд «тіньових» зон. Оптико-електронні сенсори дозволяють вести розвідку в умовах легкого туману/серпанку, низької хмарності, мають кращі можливості в умовах низької освітленості і поганої погоди, підвищені можливості щодо виявлення замаскованих цілей [3].

Збройні сили США впровадили заміну плівкових систем TARS (Tactical Air Reconnaissance Pod System) на літаках F/A-18e/F на розвідувальні контейнери AN/ASD-12 (V)/SHARP (Shared Reconnaissance Pod). Контейнерна система SHARP може підвішуватися до будь-якого стандартного пілона з інтерфейсом MIL-STD-1760 спільно з бомбовим навантаженням [4]. У контейнерах SHARP розміщуються: оптична камера середніх висот CA- 279/4, двосмугова (відео/ІЧ) висотна камера





Рис. 4. Структура контейнера SHARP

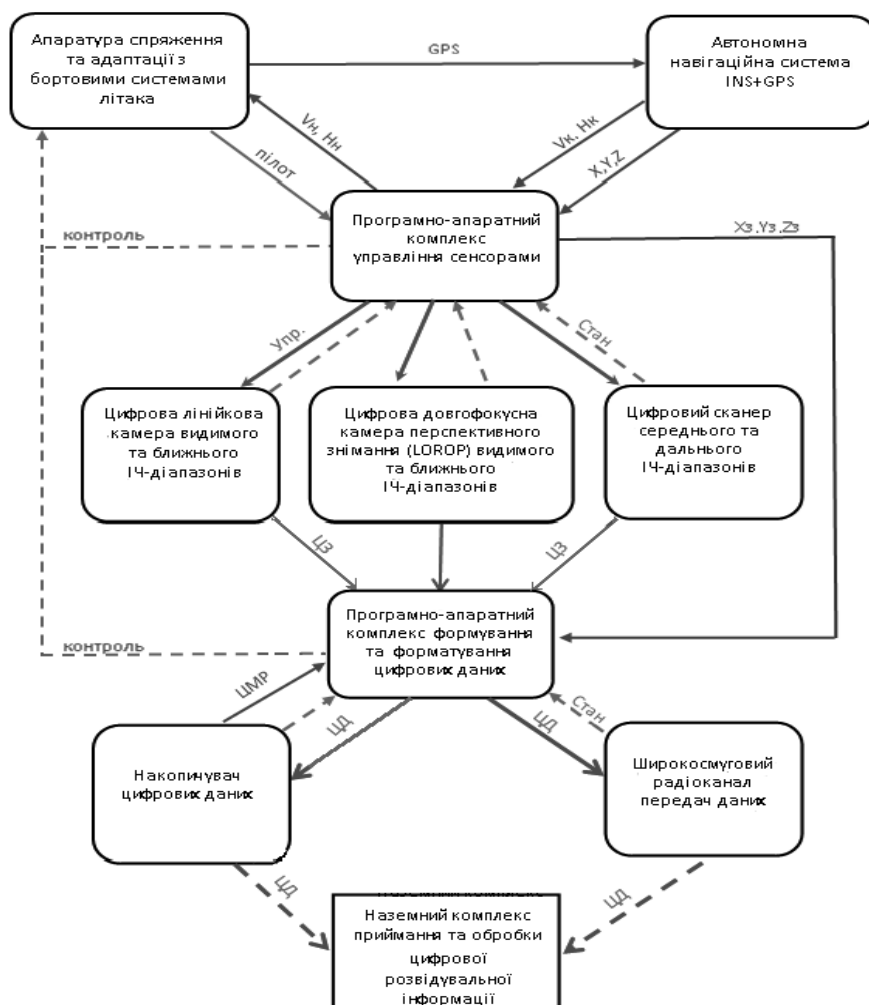


Рис. 5. Функціональна схема перспективного контейнера:

GPS – корекція інерційної системи за даними супутникової навігаційної системи літака;  $V_k$ ,  $H_k$  – дійсні параметри руху контейнера;  $V_n$ ,  $H_n$  – необхідні параметри руху контейнера (літака-носія); пілот – команди керування при директором управління контейнером;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – параметри географічного та просторового положення контейнера;  $X_z$ ,  $Y_z$ ,  $Z_z$  – координати знімків;  $U_{пр}$  – параметри управління сенсорами; Стан – стан обладнання; контроль – моніторинг роботи обладнання; ЦЗ – цифрові знімки; ЦМР – цифрові моделі рельєфу; ЦД – цифрові дані

СА-279/Н, з діапазоном робочих висот від 610 до 15 250 м на відстанях до 92,5 км, цифрова система зберігання даних місткістю 64 Мбайт, термінал лінії передачі даних діапазону К, кондиціонер (рис. 4).

Виходячи з проведеного аналізу, авторами побудована узагальнена функціональна схема перспективного контейнера для потреб ЗС України, до складу якої мають входити такі системи та обладнання (рис. 5):

апаратура спряження та адаптації з бортовими системами літака-носія;

автономна (інерційна) навігаційна система;

програмно-апаратний комплекс управління сенсорами;

цифрова лінійкова камера видимого та ближнього ІЧ діапазонів;

цифрова довгофокусна камера перспективного знімання (LOROP) видимого та ближнього ІЧ діапазонів;

цифровий сканер середнього та дальнього ІЧ діапазонів;

програмно-апаратний комплекс формування та форматування цифрових даних;

накопичувач цифрових даних;

ширококутний радіоканал передачі розвідувальних даних;

наземний комплекс приймання та обробки цифрової розвідувальної інформації.

Таким чином, на думку авторів, формування тактико-технічними вимог до перспективного контейнера повинно ґрунтуватися на таких принципах функціонування:

повна автоматизація управління роботою систем, використання цифрових технологій реєстрації та передачі розвідувальної інформації в реальному масштабі часу, інтеграція наземного комплексу приймання та обробки цифрової розвідувальної інформації в сучасні автоматизовані системи управління військами (силами) Збройних Сил України.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Скоренькій П. Е. Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період : доповідь головного інженера авіації Повітряних Сил Збройних Сил України на науково-технічній конференції. Державний інститут авіації, 2015.
2. AREOS – Airborne REconnnaissance Observation System. URL: [www.thalesgroup.com/sites/default/files/fiches\\_produits\\_aeros-gb-2015\\_0.pdf](http://www.thalesgroup.com/sites/default/files/fiches_produits_aeros-gb-2015_0.pdf).
3. RAPTOR (Reconnnaissance Airborne Pod Tornado). URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA390184>.
4. Shared Reconnaissance Pod (SHARP). URL: [http://cowvalley.org/Files/Aerial\\_Reconnaissance.pdf](http://cowvalley.org/Files/Aerial_Reconnaissance.pdf).

**Рецензент О. О. Расстригин**, д-р техн. наук, старший наук. співробітник (Центральний науководослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)

УДК 004.942

**Д. П. КУЧЕРОВ**, доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

(Національний авіаційний університет, м. Київ),

**А. М. КОЗУБ**, кандидат технічних наук, доцент

(Національний університет оборони України

ім. І. Черняховського, м. Київ),

**О. М. КОСТИНА**, кандидат військових наук,  
доцент

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

## Управління мультіагентною системою в потенціальному полі

Розглядається рух мультіагентної системи, що складається з обмеженої кількості безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Мультіагентна система включає агента-лідера і декілька агентів – членів групи. Рух цієї системи відбувається за траєкторією, яка визначається початковими умовами, її математичною моделлю і перешкодами, що є на маршруті. Кінцева мета руху відома тільки лідеру групи. Рух цієї структури розглядається в потенціальному полі, яке визначається силами притягання і відштовхування та створюється сигналами управління шляхом вимірювання відстаней до найближчих сусідів. Це дозволяє вважати групу БПЛА агрегатом деякого розміру та описати його рух системою диференціальних рівнянь другого порядку. У роботі досліджуються умови стабілізації руху, надається моделювання запропонованого підходу.

Ключові слова: групове управління, потенціальне поле, БПЛА, закон керування

Рассматривается движение мультіагентной системы, состоящей из ограниченного количества БПЛА. Мультіагентная система включает агента-лидера и несколько агентов – членов группы. Движение этой системы происходит по траектории, которая определяется начальными условиями, ее математической моделью и препятствиями на маршруте. Конечная цель движения известна только лидеру группы. Движение этой структуры рассматривается в потенциальном поле, которое определяется силами притяжения и отталкивания и создается сигналами управления путем измерения расстояний до ближайших соседей. Это позволяет считать группу БПЛА агрегатом определенного размера и описать его движение системой дифференциальных уравнений второго порядка. В работе исследуются условия стабилизации такого движения, приводится моделирование предлагаемого подхода.

Ключевые слова: групповое управление, потенциальное поле, БПЛА, закон управления

Безпілотний літальний апарат є популярною повітряною розвідувальною платформою за рахунок розвитку технологій, що дозволили застосувати велику кількість елементів конструкції та компонентів управління рухом для її створення. Останнім часом розробники безпілотних засобів звертають увагу на повітряні платформи з програмним управлінням, що мають можливості вертикального старту та посадки, до яких відносяться мультикоптери. Ці платформи здатні не тільки нести корисне навантаження, а й виконувати політ за гнучкою програмою. Їх основними завданнями можуть бути спостереження землі, виконання пошуково-рятувальних операцій, виявлення пожеж, доставка вантажів, а також військові. Перевагами БПЛА є низька вартість експлуатації, відсутність пілота, що виключає ризик втрати життя людини, програмне виконання завдань.

Інтуїтивно можна припустити, що декілька БПЛА виконують завдання точніше та за менший час, ніж один. Параметрами оцінювання ефективності дій групи окрім показників точності та часу можуть бути кількість виконаних завдань, об'єктивність і достовірність його виконання. Проте групова поведінка є більш складною, ніж поведінка одного БПЛА.

Для синтезу керування груповою поведінкою звичайно використовують агентний підхід. Важливим завданням мультіагентної системи, як і в разі одного БПЛА, є планування маршруту. Це завдання ускладняється вимогою безпеки польотів, що досягається збільшенням відстані між агентами. При цьому для збереження цілісності групи відстань між агентами не повинна бути занадто великою.

Спільне виконання завдань повинне забезпечуватись механізмом та порядком взаємодії для досягнення поставленої мети. Класичним підходом до вирішення цієї проблеми в наукових роботах є застосування методів, заснованих на поведінці тварин, птахів і комах. На жаль, не всі ці методи придатні для застосування в технічних засобах, тому що групою технічних агентів звичайно керує людина-оператор, група складається з обмеженої кількості БПЛА, вона повинна діяти в умовах реального середовища, де є завади та перешкоди руху. Врахування цих властивостей на порядок збільшує потік даних в системі, що веде до зростання технічної та обчислювальної складності розроблюваної системи.

**Метою** статті є синтез закону управління та дослідження стабільності руху за маршрутом групи агентів, що складається з агента, який виконує функції лідера, і агентів-членів, які слідують за ним в умовах фіксованих перешкод природного походження. Закон управління повинен враховувати долання «вузьких місць», що вимагає перестроювання групи.

Матеріал статті є продовженням роботи, представленій на міжнародній конференції «Методи і системи навігації та управління рухом (MSNMC)» [1], де наданий опис динаміки групи БПЛА за наявності перешкод. Не зважаючи на те, що на даний час складено чимало оглядів та публікацій про мультіагентні системи, найбільш загальні питання про цей клас систем викладено в [2]. У цій монографії вводиться поняття автономних

агентів, що здатні виконувати незалежну діяльність. Узагальнена архітектура агентської системи має три рівні управління, що відповідають за планування, поведінку і взаємодію елементів системи.

Результати використання мультиагентних систем при виконанні практичних завдань надані в роботах [3–6]. У [3], наприклад, використовують принципи мурашиної колонії для бездротових сенсорних мереж та нової функції маршрутизації. Запропонований алгоритм оптимізації синтезований у вигляді імовірнісної процедури, за допомогою якої авторам вдається зменшити обсяг обчислювальних операцій, що виникають в процесі доставлення інформаційних пакетів. Позитивні результати автори отримують за рахунок використання відомого підходу на основі алгоритмів пошуку, випаровування і агрегації.

У роботі [4] пропонуються алгоритми координації та оптимізації мультиагентної системи RobotCup для виконання рятувальних операцій. Координація агентів здійснюється за протоколом, що передбачає укладання контракту (домовленостей), а оптимізація шляху – за модифікованими алгоритмами  $A^*$  та пошуку Нільссона. У роботі показано переваги децентралізованого управління для виконання типових завдань.

Автори [5] розглядають рой БПЛА, що складається з квадрокоптерів, дії яких моделюються за алгоритмами поведінки тварини і рою комах. Проведений експеримент показав, що якість мультиагентної системи залежить від кількості агентів, але при цьому зростає кількість зв'язків в групі, що ускладнює управління системою.

Стеження робота за ціллю, що рухається, розглянуто в роботах [6, 7]. Рух колісних засобів [6] та рою БПЛА [7] відбувається в адитивному потенціальному полі сил притягання і відштовхування. Результируюча сила залежить від взаємного розташування, швидкості та прискорення, що складаються між роботом і ціллю. Зупинка робота здійснюється за координатами відносної швидкості та прискорення.

Автори роботи [8] вводять поняття агрегації для руху та контролю дій агрегату з кінематичними зв'язками. Агенти описуються інтеграторами, перехід на інші позиції здійснюється в ковзному режимі. Головна ціль руху полягає в уникненні «невигідних» позицій на шляху. Рух здійснюється в потенціальному полі, що являє собою замкнену область з центром, яку автори подають диском певного радіуса. Недоліком такого подання є використання сигналів управління значної амплітуди, які й викликають ковзний режим агентів, що призводить якнайменше до затягування процесу керування.

Автори [9, 10] пропонують опис дій групи агентів мережною структурою. Ізольовані агенти співпрацюють на основі певних правил і домовленостей. Дії агента здійснюються на основі протоколу переговорів між сусідами, відповідно до якого створюються принципи самоорганізації агентської мережі. З метою підтримки співпраці агента і уникнення затримки в процесі організації авторами пропонується механізм взаємних поступок при управлінні і алгоритм Q-навчання.

При вирішенні практичних завдань найбільш цікавим є планування маршруту. Сучасні результати, присвячені цій темі, надані в роботах [11–13]. Поєднання розширеного евристичного алгоритму пошуку  $A^*$  і стохастичного підходу до динамічного програмування при плануванні траєкторії безпілотної наземного транспортного засобу пропонується в роботі [11]. Для уникнення ям, канав і заторів на маршруті безпілотної засіб використовує інформацію від оптико-електронних датчиків, якими він оснащений, що дозволяє оптимізувати маршрут у режимі реального часу.

Задача планування маршруту БПЛА з нерухомим крилом за рахунок використання диференціальної геометрії вирішується в роботі [12]. Для відпрацювання поворотів за мінімальний інтервал часу з постійною швидкістю автори пропонують будувати маршрут за кривими Dubins, що подаються дугами кіл і відрізками прямих, але при цьому бічне прискорення стає переривчастим. Безперервність прискорення в роботі досягається застосуванням годографа Піфагора. У роботі [13] автори вирішують аналогічну проблему кривими Без'є.

За стабільну та надійну роботу групи відповідає підсистема зв'язку. У роботах [14, 15] розглядаються проблеми забезпечення надійності підсистеми передачі даних. Загальні підходи до проектування цієї підсистеми наведені в [14], особливості, що виникають при передачі даних, та алгоритми щодо їх врахування можна знайти в [15]. Планування траєкторії методами теорії графів розглянуто в [16]. Рух роботів здійснюється в межах заданих траєкторій. У цій роботі рух роботів розглядається як повністю детермінована задача з постійною швидкістю і без перешкод.

Рішення задачі стеження роєм БПЛА за рухомою мішенню надається в роботі [17]. Рух рою відбувається в потенціальному полі, що створюється контролерами роботів відносно робота-лідера за принципом зворотного зв'язку. Запропонований в роботі критерій Ляпунова оцінює стабільність руху тільки на великому інтервалі часу, і він не може дати оцінку за наявності перешкод. Практична реалізація роботів, що слідує до цілі за умови перешкод надається в роботі [18]. На жаль, запропонований в роботі метод не підходить для управління БПЛА.

У порівнянні з роботою [1], в цій роботі розроблюється синтез керування рухом БПЛА за умов обмеженого розміру групи, який не є фіксованим та може збільшуватися при маневрах та огинанні перешкод.

Розглядається рій БЛА, що складається з  $N$  агентів, які позначені  $A_1, \dots, A_n$  на рис. 1. Рій виконує завдання з моніторингу або видової розвідки певної ділянки земної поверхні в евклідовому просторі  $(x, y, z)$ . Для виконання цього завдання агенти можуть використовувати відомі тактики, наприклад «пеленг», «клин», інші або виконують автономний політ.

На рис. 1 показані траєкторії руху 4-х БПЛА, що складають мультиагентну систему, яка виконує завдання моніторингу за заданим маршрутом, на якому є перешкоди  $M_1, M_2$  з відомими координатами  $(x_M, y_M, z_M)$ . Для уникнення зіткнень та збереження конфігурації групи

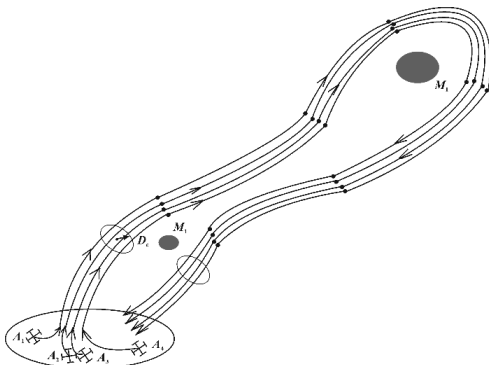


Рис. 1. Група з 4-х БПЛА здійснює політ за маршрутом

при виконанні руху передбачається приблизно рівна швидкість переміщення агентів  $v_i \approx v_j$ ,  $i \neq j$ .

Подамо структуру рою БПЛА утворенням обмеженого розміру. Використовуючи термінологію [8], це утворення назовемо агрегатом з деяким центром ваги. Будемо вважати, що кожний агент агрегату забезпечується засобами зв'язку і управління для здійснення руху.

Агенти рухаються в тривимірному евклідовому просторі, в якому можуть зустрітися перешкоди. Наявні органи управління дозволяють здійснити маневр та обійти перешкоди. Позначимо  $p_i$  положення  $i$ -го агента і  $u_i$  – керуючий сигнал у просторі, де  $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ . Тоді динамічну модель руху  $i$ -го агента можна описати диференціальними рівняннями другого порядку у вигляді [1, 5, 7]

$$\ddot{p}_i = k_i u_i. \quad (1)$$

У (1)  $p_i$ ,  $u_i$  є функціями часу  $t$ . Як і в [8], введемо параметр агрегату  $D_\varepsilon > 0$ , що характеризує розмір, який при  $\forall t \rightarrow \infty$  підтримується сигналами керування  $u_i$

$$p_i \rightarrow D_\varepsilon(p_c), \quad (2)$$

де параметр центрального агента (лідера)

$$p_c(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(t) \quad (3)$$

та

$$D_\varepsilon(p_c) = \{p \in \mathbb{R}^3 : d = \|p - p_c\| < \varepsilon\}. \quad (4)$$

У (4)  $\varepsilon$  є конструктивним параметром, який визначається розробником системи. Рівняння (4) є критерієм забезпечення цілісності групи.

Якщо на маршруті БПЛА є перешкоди, конфігурація групи змінюється, вибирається новий її тип, що забезпечує їх подолання, у загальному випадку це трохи збільшує параметр  $D(p)$  так, щоб забезпечити нерівність  $D(p) \leq D_\varepsilon(p)$ . Це передбачає зміну конфігурації утворення «в малому» та не змінює загальної цілі групи.

У статті ставиться та вирішується задача синтезу керування групою з  $n$  БПЛА, яка рухається по маршруту, на якому зустрічаються перешкоди природного типу з фіксованими параметрами, щоб забезпечити справедливість умови  $D(p) \leq D_\varepsilon(p)$ .

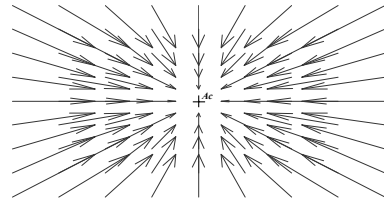
**Метод потенціального поля.** Як і в роботах [6–8, 17], подамо мультиагентну систему полем агентів, яке утворюється силами притягання і відштовхування. Енергія притягання підтримує обрану конфігурацію, а

енергія відштовхування утримує агентів від зіткнення між собою та з перешкодами.

Енергія поля притягання описується рівнянням

$$E_{att}(\Delta p_i) = \frac{1}{2} \mu (\Delta p_i)^2, \quad (5)$$

де  $\mu > 0$  коефіцієнт масштабування,  $\Delta p_i = \|p_i - p_c\|$  – евклідова відстань між  $i$ -м і центральним агентами. Вигляд сил, що діють на агента  $A_c$  в однорідному полі притягання, показаний на рис. 2. Сили поля слабше діють в центрі і сильніше по краях групи.


 Рис. 2. Поле, утворене силою притягання, що діє на агента  $A_c$ 

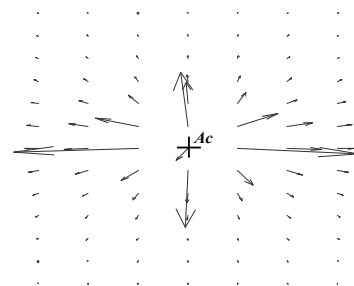
Сили, що створюються полем притягання, мають вигляд [20]

$$u_{att}(\Delta p_i) = -\text{grad } E_{att}(\Delta p_i) = -\mu(\Delta p_i). \quad (6)$$

Енергія відштовхування обчислюється як [19]

$$E_{rep}(\Delta p) = \begin{cases} \frac{1}{2} v \left( \frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & \text{if } \Delta p_i \leq d_0, \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $v > 0$  – коефіцієнт масштабування,  $d_0 > 0$  – константа, яка визначає відстань максимальної дії на найближчого агента. Вигляд відштовхуючого поля (7) показано на рис. 3. Це поле сильніше в центрі, на відміну від поля тяжіння.


 Рис. 3. Поле, утворене силою відштовхування, що діє на агента  $A_c$ 

Силу відштовхування можна подати виразом

$$u_{rep}(\Delta p_i) = -\text{grad } E_{rep}(\Delta p_i) = \begin{cases} v \left( \frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{\Delta p_i^2} \frac{p_i - p_0}{d_0(\Delta p_i)}, & (8) \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0. \end{cases}$$

$$\text{if } \Delta p_i \leq d_0,$$

У (8)  $p_0$  – координати агента до найближчої перешкоди і  $d_0(\Delta p_i) = \|p - p_0\|$  є його евклідовою відстанню.

Тоді загальний закон керування, що дозволяє агентам досягати цілі, подається адитивною сумою складових

$$u_i^g = u^i + u_i^{att} + u_i^{rep}, \quad (9)$$

де  $u_i$  – закон руху  $i$ -го агента в агрегаті, а  $u_i^{att}$ ,  $u_i^{rep}$  – складові, що визначаються за формулами (6), (8).

Якщо  $i$ -й агент є лідером групи, тоді  $u^i = u^l$ . Траєкторія лідера визначається до початку руху, динаміка його руху описується системою рівнянь, подібною (1):

$$\begin{aligned} \dot{p}_1^l &= p_2^l, \\ \dot{p}_2^l &= k^l u^l, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $u^l$  – відомий закон, траєкторії інших агентів будуються відносно нього. Такий підхід дозволяє ввести два кінцеві стани, початковий стан  $(0, 0, 0)$  і кінцевий стан  $(p_k, 0, 0)$  для кожного агента системи.

Розглянемо три типи руху агрегату: прямолінійний, криволінійний, з перешкодами.

**Прямолінійний рух групи.** У цьому випадку лідер рухається без прискорення. Тоді (10) перетворюється на одне рівняння

$$\dot{p}_1^l = p_2^l = \text{const}. \quad (11)$$

Завдання  $i$ -го агента в русі – зберегти свою позицію в групі або не допускати впливу на інших агентів. Закон управління подається у вигляді

$$u^i = \begin{cases} -k_{p1}(p_{1i} - p_{1j}) - k_{p2}(p_{2i} - p_{2j}), & \text{якщо } i, j \text{ є агентами групи,} \\ 0 & \text{для тих, що не належать групі.} \end{cases} \quad (12)$$

Для лідера  $j = l$ . Тут  $k > 0$  – позитивний коефіцієнт, який встановлює швидкість агента. Крім того, існує пара малих  $\xi_{p1} \neq 0$ ,  $\xi_{p2} \neq 0$  така, що відхилення  $|p_{1i} - p_{1j}| \leq \xi_{p1}$  і  $|p_{2i} - p_{2j}| \leq \xi_{p2}$ , які мають місце в (12) та необхідні для підтримання стабільного руху.

Якщо лідер знаходиться в центрі групи, його координати визначаються рівняннями (3), а саме

$$p^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} p_i, \quad p^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} p_i, \quad (13)$$

де  $N^* < N$  – кількість сусідів (агентів) у групі. Цей тип руху показаний на рис. 4.

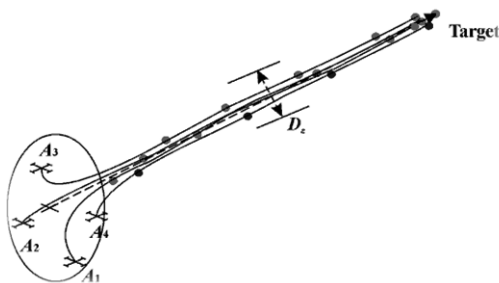


Рис. 4. Рух групи БПЛА за прямою

**Лема 1.** Рух кожного агента групи, що складається з  $N$  агентів, подається системою диференціальних рівнянь другого порядку у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= p_2, \\ \dot{p}_2 &= \bar{u} = -k_{p1}(p_{1i} - p_{1j}) - k_{p2}(p_{2i} - p_{2j}), \end{aligned} \quad (14)$$

де  $p = p_i - p_j$  – відповідні координати  $i$ -го та  $j$ -го агентів,  $i \neq j$ ,  $i \leq n$ ,  $j \leq n$ . Якщо  $j = n$ , це лідер групи.

**Доведення.** Твердження випливає безпосередньо з (9), (11).

**Висновок 1.** Замкнена динамічна система (14) збігається до рівноважного стану

$$p_{1i} - p_{1j} \neq 0, \quad p_{2i} - p_{2j} \neq 0. \quad (15)$$

**Висновок 2.** Швидкість агентів-членів асимптотично наближається до швидкості агента-лідера.

**Висновок 3.** У системі (14) координати  $p_i \neq p_j$  для будь-якого  $i \neq j$  при  $t \geq 0$ .

**Висновок 4.** Якщо максимальні відстані між БПЛА в групі  $\|p_i - p_j\| < \varepsilon$ , то розмір агрегату  $D(p) < D_\varepsilon(p)$ .

**Криволінійний рух.** Такий рух здійснюється з прискоренням, умова (11) не виконується, а динамічна система (14) трансформується в

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= p_2, \\ \dot{p}_2 &= \dot{p}_2^l + \bar{u}. \end{aligned} \quad (16)$$

Координати  $p_1, p_2$  в (16) збігаються з тими ж координатами в системі рівнянь (14), але керуючий сигнал є значенням  $|\bar{u}| < U_{\max}$ . Цей тип руху показаний на рис. 5.

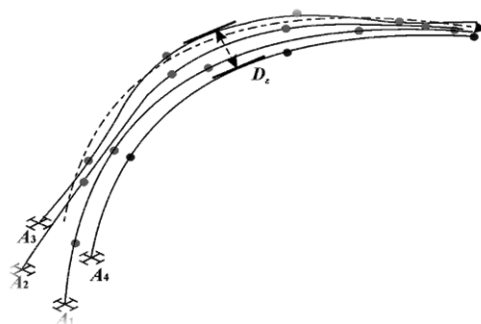


Рис. 5. Рух БПЛА уздовж кривої

**Лема 2.** Якщо існують коефіцієнти  $k_y$  і  $k_p$  такі, що  $k_y > 0$ ,  $k_p > 0$ , і є справедливою нерівність  $0,5k_y/k_p < 0$ , то система (15) є експоненційно стійкою.

**Доведення.** Уявимо систему рівнянь (16) диференціальним рівнянням

$$k_p \ddot{e}_p(t) + k_y \dot{e}_y(t) + k_y e_y(t) = 0, \quad (17)$$

де  $e_p = p_i - p_j$ ,  $e_y = y_i - y_j$ ,  $e_y = \dot{y}_i - \dot{y}_j$ . Якщо  $k_p \neq 0$ , і  $(k_p, k_y)$  є позитивними коефіцієнтами, то це рівняння може бути поданим у алгебраїчній формі

$$s^2(t) + k_y/k_p s(t) + k_y/k_p = 0. \quad (18)$$

Тоді умова експоненційної стійкості (15) отримується при негативній дійсній частині коренів (18), що виконується при  $k_y/(2k_p) < 0$ .

**Висновок 1.** Якщо  $k_y = 0$ , то агенти виконують коливальний рух навколо лідера з постійною амплітудою і частотою, що дорівнює  $\sqrt{k_y/k_p}$ .

**Висновок 2.** Якщо  $k_y/\sqrt{4k_y k_p} > 0$ , то забезпечується стійкий рух в асимптотиці.

Висновок 3. Якщо  $0 < k_y / \sqrt{4k_y k_p} < 1$ , відбувається коливальний рух, амплітуда якого зменшується.

Висновок 4. Якщо  $k_y / \sqrt{4k_y k_p} > 1$ , відбувається аперіодичний рух агента.

Висновок 5. Якщо максимальна відстань між БПЛА в групі  $\|p_i - p_j\| \leq \epsilon$ , то розмір групи  $D(p) \leq D_\epsilon(p)$ .

**Рух в умовах перешкод.** Існуючі підходи до розгляду руху агентів з перешкодами передбачають дію сили відштовхування від перешкод, що розташовані на маршруті. Дія цієї сили зростає, коли агент наближується до перешкод (гальмує агента), і зменшується з віддаленням. При огинанні перешкоди агент має докладати додаткові зусилля, що можуть привести до відхилення від первинного маршруту. Це досягається введенням у силу відштовхування адитивних компонент швидкості агента і прискорення

$$u_i = \begin{cases} u_{rep\ p_i} + u_{rep\ p_{1i}} + u_{rep\ p_{2i}}, \\ \text{if } (d - 2r) \leq d_0, \ p_{1i} > 0, \ p_{2i} > 0 \\ u_{rep\ p_i} + u_{rep\ p_{1i}}, \\ \text{if } (d - 2r) \leq d_0, \ p_{1i} > 0, \ p_{2i} \leq 0, \\ 0, \text{ if } (d - 2r) > d_0, \text{ or } p_{2i} \leq 0. \end{cases} \quad (19)$$

У системі рівнянь (19) використовуються

$$u_{rep\ p_i} = k_1 \left( \frac{1}{d - 2r} - \frac{1}{d_0} \right), \quad (20)$$

$$u_{rep\ p_{1i}} = k_2 p_{1iobs}, \quad (21)$$

$$u_{rep\ p_{2i}} = k_3 p_{2iobs}, \quad (22)$$

де  $r$  – максимальний геометричний розмір агента,

$$p_{1iobs} = p_{1i}^T n_{aobs}, \quad (23)$$

та

$$p_{2iobs} = p_{2i}^T n_{aobs}, \quad (24)$$

де  $n_{aobs}$  – одиничний вектор, спрямований від  $i$ -го агента на перешкоду. Значення  $p_{1iobs}$  показує рух агента: якщо  $p_{1iobs} > 0$ , агент рухається на перешкоду, якщо  $p_{1iobs} < 0$ , здійснюється рух у протилежному напрямі. Рух групи, що складається з 4 агентів, які проходять перешкоди, показаний на рис. 6.

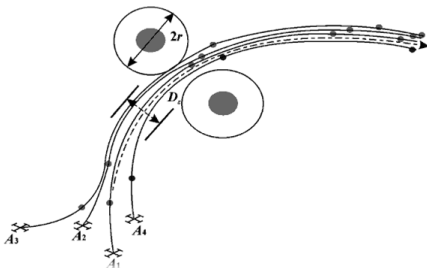


Рис. 6. Рух групи з 4-х агентів в умовах перешкод

Порядок долаття перешкод, що створюють вузькі місця, відбувається зі зміною конфігурації групи, як показано на рис. 6. При цьому відбувається сортування БПЛА за швидкістю, першим проходить той, що

ближчий та має більшу швидкість:  $p_{1N} < p_{1(N-1)} < \dots < p_{12} < p_{11}$ . Сортування може проводитися інакше, якщо опорним обрати лідера групи.

**Модель БПЛА.** Як динамічну модель БПЛА обрано модель квадрокоптера, що відрізняється простотою керування, стабільністю руху, можливістю зависання в повітрі, прийнятною вартістю. Детальний опис моделі надано в [21]. Модель подається системою диференціальних рівнянь другого порядку

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi} \left( \frac{I_y - I_x}{I_x} \right) - \frac{J_r}{I_x} \dot{\theta}w + \frac{l}{I_x} U_2, \\ \ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi} \left( \frac{I_z - I_x}{I_y} \right) - \frac{J_r}{I_y} \dot{\phi}w + \frac{l}{I_y} U_3, \\ \ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta} \left( \frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_z} U_4, \\ \ddot{z} = -g + (\cos\phi \cos\theta)kU_1, \\ \ddot{x} = (\cos\phi \cos\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi)kU_1, \\ \ddot{y} = (\cos\phi \cos\theta \sin\psi + \sin\phi \cos\psi)kU_1 \end{cases} \quad (25)$$

Тут  $\phi, \theta, \psi$  – кути крену, тангажу і ролу відповідно,  $I_{x,y,z}$  – інерція БПЛА,  $J_r$  – інерція ротора,  $l$  – розмах квадрокоптера,  $k = 1/m$ ,  $m$  – маса БПЛА,  $w$  – швидкість обертання ротора, величини  $U_1, U_2, U_3, U_4$  обчислюються так:

$$\begin{cases} w = w_2 + w_4 - w_1 - w_3, \\ U_1 = b(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2), \\ U_2 = b(w_4^2 - w_1^2), \\ U_3 = b(w_3^2 - w_1^2), \\ U_4 = d(w_2^2 + w_4^2 - w_1^2 - w_3^2), \end{cases} \quad (26)$$

де  $b, d$  – коефіцієнти тяги і опору відповідно.

Для моделювання (25) перетворюється у форму простору станів, де  $X \in \mathbb{R}^{12}$  – вектор стану з координатами

$$\begin{aligned} x_1 &= \phi, \ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\phi}, \ x_3 = \theta, \ x_4 = \dot{x}_3 = \dot{\theta}, \\ x_5 &= \psi, \ x_6 = \dot{x}_5 = \dot{\psi}, \ x_7 = z, \ x_8 = \dot{x}_8 = \dot{z}, \\ x_9 &= x, \ x_{10} = \dot{x}_9 = \dot{x}, \ x_{11} = y, \ x_{12} = \dot{x}_{11} = \dot{y}. \end{aligned} \quad (27)$$

В цьому випадку модель квадрокоптера подається в просторі станів системою диференціальних рівнянь 1-го порядку

$$\begin{cases} \dot{x}_2, \\ x_4 x_6 a_1 + x_4 a_2 w + b_1 U_2, \\ \dot{x}_4, \\ x_2 x_6 a_3 + x_2 a_4 w + b_2 U_3, \\ \dot{x}_6, \\ x_4 x_2 a_5 + b_3 U_4, \\ \dot{x}_8, \\ -g + (\cos x_1 \cos x_3)kU_1, \\ \dot{x}_{10}, \\ u_x k U_1, \\ \dot{x}_{12}, \\ u_y k U_1, \end{cases} \quad (28)$$

де

$$a_1 = \frac{(I_y - I_z)}{I_x}, \quad a_2 = -\frac{J_r}{I_x}, \quad a_3 = \frac{(I_z - I_x)}{I_y}, \quad a_4 = \frac{J_r}{I_y}, \quad (29)$$

$$a_e = \frac{(I_x - I_y)}{I_x}, \quad b = \frac{l}{I_x}, \quad b = \frac{l}{I_y}, \quad b = \frac{l}{I_x}.$$

$$u_x = \cos x_1 \sin x_3 \cos x_5 + \sin x_1 \sin x_5, \quad (30)$$

$$u_y = \cos x_1 \sin x_3 \cos x_5 - \sin x_1 \sin x_5.$$

На відміну від [21], де використовується змінний режим для управління, керуючі дії ( $U_1, U_2, U_3, U_4, u_x, u_y$ ) кожного агента є гладкими функціями часу  $t$ .

**Моделювання.** Розглядається група БПЛА, яка рухається в потенціальному полі в напрямку цілі за маршрутом, на якому є перешкоди. Група складається з чотирьох квадрокоптерів, один з них виконує функцію лідера. Маршрут агентів задається початковою та кінцевими позиціями на площині в декартових координатах. Початкові позиції агентів  $p_{A1} = (100, 30)^T$ ,  $p_{A2} = (75, 20)^T$ ,  $p_{A3} = (130, 50)^T$  та лідера групи  $p_{A4} = (110, 70)^T$ , кінцева позиція  $p_k = (600, 270)^T$ . Задані також координати розташованих на площині стаціонарних перешкод на маршруті як  $p_{n1} = (270, 130)^T$ ,  $p_{n2} = (220, 210)^T$  і  $D_e(p_A) \leq 50$ . Рух агентів-членів і агента-лідера цільовий показаний на рис. 7.

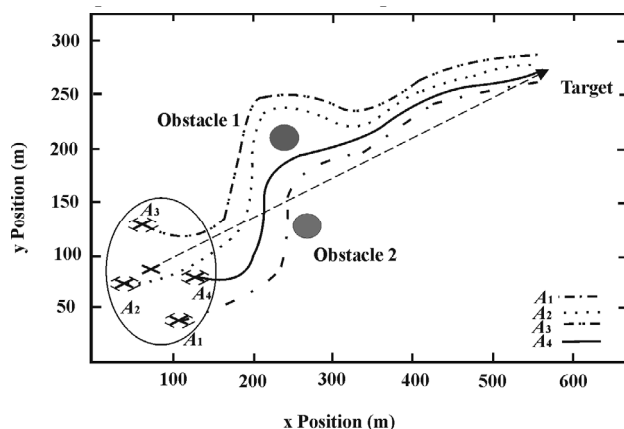


Рис. 7. Траєкторії руху групи до цілі з огинанням перешкод

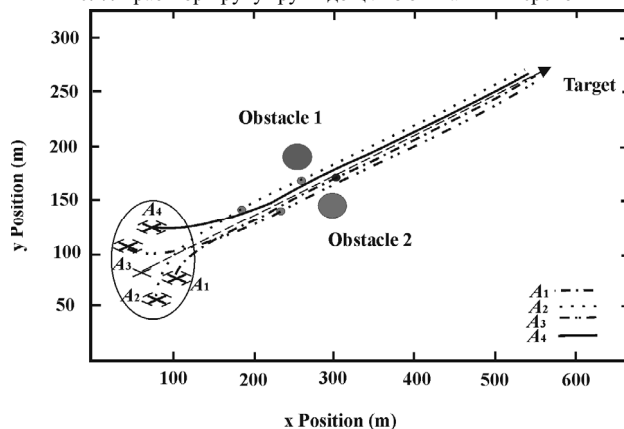


Рис. 8. Траєкторії руху БПЛА зі зміною конфігурації

На рис. 7 показано, що агенти в процесі руху огинають перешкоди і продовжують рух до цілі. За необхідності при подоланні перешкод група агентів може змінювати конфігурацію. Якщо не існує перешкод на

маршруті, структура агентів, якою здійснюється політ, не змінюється. Приклад реконфігурації групи БПЛА показаний на рис. 8. При доланні перешкоди руху типу «вузьке місце» агенти перестроюються в «колонну» в жорстко визначеному порядку:  $A4 \rightarrow A3 \rightarrow A2 \rightarrow A1$ , при цьому агент  $A1$  стає першим, а  $A4$  – останнім.

**Висновки.** У роботі запропоновано синтез закону управління рухом мультиагентної системи для слідування за маршрутом, на якому можливі перешкоди руху. Особливістю запропонованого підходу є синтезований закон управління з гладкою функцією часу. Показано також два способи долання перешкод, один з них заснований на огинанні, а інший на реконфігурації. Закон управління формується за двома спеціальними потенціальними функціями, одна з яких створює силу притягання агентів до центра структури, друга відштовхує їх від сусідів та перешкод. Конфігурація польотної групи в умовах перешкод змінюється, що припускає відповідні зміни розміру та форми.

На підставі запропонованого закону управління розроблено алгоритм, за яким проводилося моделювання агентної системи. Наведені приклади моделювання поведінки цієї системи показують стабільність руху групи агентів. Вивчення впливу параметрів системи, що забезпечують її стабільний рух, дозволило встановити відповідні параметри системи. Аналіз поведінки групи включав до себе етапи збору групи в певну конфігурацію, слідування заданим маршрутом і уникнення перешкод. Дослідження показують, що успішне моделювання залежить від обраних значень масштабних коефіцієнтів  $\mu$  і  $\nu$  потенціальних функцій.

Майбутні дослідження мультиагентної системи плануються спрямувати на вивчення козвних режимів у русі із запропонованими потенціальними функціями.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Kuchеров D. P., Kozub A. N., Kostyna O. N. Group Behavior of UAVs in Obstacles Presence // Proc. IEEE 4th Int. Conf. Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2016.
2. Wooldridge M. An Introduction to multi-agent systems. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
3. Benu C. Goel, Sheenam. Ant Colony Optimization for Wireless Sensor Network: A Review // IOSR-JCE. 17(3). 89–92. 2015.
4. Chou W.Y.J., Marsh L., Gossink D. Multi-Agent Coordination and Optimisation in the RoboCup Rescue Project // Proc. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, 2009.
5. Bandala A. A., Dadios E. P., Vicerra R. R. P., Lim L. A. G. Swarming Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Quadrotors – Swarm Behavior for Aggregation, Foraging, Formation, and Tracking // J. of Advanced Comput. Intell. and Intell. Inform., 18(5), 745–751, 2014.
6. Yin L., Yin Y., and Lin C.-J. A new potential field method for mobile robot path planning in the dynamic environments // Asian J. of Control. 11(2). 214–225. 2009.



7. Dang A. D., Horn J. Intelligent Swarm-Finding in Formation Control of Multi-Robots to Track a Moving Target // *Int. J. of Computer, Electr., Autom., Control and Inf. Eng.* 8(4). 561–567. 2014.
8. Gazi V., Fidan B., Hanay Y. S., Köksal M. I. Aggregation, Foraging, and Formation Control of Swarms with Non-Holonomic Agents Using Potential Functions and Sliding Mode Techniques // *Turk. J. of Electr. Eng.* 15 (2). 149–168. 2007.
9. Zhang L., Gui H. Optimal Strategies for Agents in an Alternating Offers Negotiation Protocol Considering Time Constraint // *J. of Autom. and Control Eng.* 4 (4). 313–318. 2016.
10. Jesintha D. K., Anandh J. P., Ramnath M. Dynamic analysis of agent network in self organization using service level agreement technique // *Int. J. of Eng. Sci. Invent.* 4 (3). 44–49. 2015.
11. Marsh L., Calbert G., Tu J., Gossink D., Kwok H. Multi-Agent UAV Path Planning // *Int. Congress on Modelling and Simulation, MODSIM05. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, 2005.
12. Shanmugavel M., Tsourdos A., White B. A., Zbikowski R. Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs // *Trans. of ASME J. of Dyn. Syst., Meas., and Control*, 129(3). 620–632. 2007.
13. Kucherov D. P. Agent-based approach to the problem movements by the route // *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukr. National University*. 4 (211). 168–171. 2014.
14. Çuhadar İ., Dursun M. Unmanned Air Vehicle System's Data Links // *J. of Autom. and Control Eng.* 4 (3). 189–193. 2016.
15. Kucherov D. P., Kozub A. N. Control System Objects with Multiple Stream of Information // *proc. IEEE 3rd Int. Conf. Actual Problems of UAV Developments (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 2015.
16. Wang Y., Hu C. Moving as a whole: multirobot traveling problem constrained by connectivity // *Turk. J. of Electr. Eng. & Comput. Sci.*, 23, 769–788. 2015.
17. Dang A. D., Horn J. Formation Control of Leader-Following UAVs to Track a Moving Target in a Dynamic Environment // *J. of Autom. and Control Eng.* 3 (1). 1–8. 2015.
18. Ansary A. A., Hasan M. M. An Intelligent Line Following Robot with Obstacle Detection // *Int. J. of Sci. and Eng. Investig.* 5 (53). 44–48. 2016.
19. Jain M. C. *Textbook of Engineering Physics (Part I)* : PHI Learning Private Ltd, 2009.
20. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical handbook for sceintist and engineers* : McGraw-Hill Company, 1968.
21. Bouabdallah S., Siegwart R. Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor // *proc. IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, Barcelona, Spain, 2005.

**Рецензент С. В. Лапицький**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та  
військової техніки Збройних Сил України)

**O. V. SHEFER,**

*candidate of sciences (technical), associate professor,  
Associate Professor of automation and electric drive  
Department  
(Poltava National technical Yuri Kondratyuk  
University)*

## **The prospects and peculiarities of plasma with hollow cathode using for satellite telecommunications noise stability increase**

*Розглянуті переваги та особливості застосування штучно створеного плазмового середовища з метою компенсації зовнішньої плазмової оболонки для підвищення завадостійкості супутникових телекомунікацій. Встановлено загальну закономірність впливу ефекту в плазмі порожнистого катода на створення завадостійкого середовища, що залежить від умов використання енергії швидких електронів під час їх коливального руху, позитивних іонів, швидких нейтральних частинок, метастабільних атомів та фотонів.*

*Рассмотрены преимущества и особенности применения искусственно созданной плазменной среды с целью компенсации внешней плазменной оболочки для повышения помехоустойчивости спутниковых телекоммуникаций. Установлена закономерность влияния эффекта в плазме полового катода на создание помехоустойчивой среды, которая зависит от условий использования энергии быстрых электронов при их колебательном движении, положительных ионов, быстрых нейтральных частиц, метастабильных атомов и фотонов.*

### **The set of the problem.**

The ascent phase of the spacecraft (SC) to the orbit designed for the SC lifting above the Earth's surface and its dispersal to the necessary velocity.

With the use of the grounds and the satellites systems of the wireless communication, the problem of the information exchange between mobile objects is solved. This problem looks particularly acute during the SC insertion to the orbit, since there are such extreme conditions as the flight path, the aerodynamic resistance of the external gas environment, the solar and the geomagnetic activity and other factors, that significantly affect to the quality of communication with the spacecraft.

In the conditions of atmospheric entry of SC at the hypersonic speeds, through the aerodynamic resistance of external gas environment, their cover heats up. Such SC's include: the piloted space objects, space landers, space probes, warheads of intercontinental rockets, capsules with tests, and also objects which can or have to burn down, for instance, satellites which have fulfilled the resource and so forth.

As a result of heating, the huge number of heat, which leads to formation of plasma around flight vehicles is allocated. Plasma completely absorbs radar radiation. As a consequence, a frequency selective fading environment, impervious to signals of the systems of satellite telecommunications forms.

This environment completely blocks the radio signals therefore the SC isn't able to perform telemetric communication with its stations within several minutes. This period is the most dangerous from the reliability's and safety's point of view for the SC flight.

The problem in the military aspect is not less urgent: radar signals of hypersonic heads of rockets homing and fighting blocks of intercontinental ballistic are blocked and that can lead to the unforeseen consequences.

The problem of ensuring stable radio communication with the SC is quite acute

### **The review of recent researches and publications.**

In the beginning of XXI century, leading space countries has made the mutual international standard CCSDS for the radio line transmission of specific SC information creation [1]. With the purpose of preventing loss of communication and telemetry with the SC, several approaches were proposed [2]. For instance, antennas with thermal protection, the design of which own a decreased sensitivity of its radio transparency for the interaction with the ionized gas of aerodynamic heating. Or the using of long hot-resistant antennas, which are represented like the tape of the plasma sheath. In [3] the creation of the devices for the passage of radio waves through the plasma is represented, but such devices require substantial amounts of energy. In [4] use of a special external screen with a metal ring, located in the dense plasma behind the shock wave and the creation of electric field in the vicinity of slit antenna to compensate the influence of the external ionized gas for the radio signal passage were proposed. At the same time, available sources don't provide the information about the deterioration of aerodynamics and other negative factors.

**The formulation of an objective of the study.** The purpose of the task is to create a noise immunity environment on the basis of artificially created energy efficient compact plasma device in the middle of the SC for the radio transparent medium creation.

#### The main material.

The latest technologies have changed the ideology of noise immunity radio communication systems construction, have made the application of sophisticated tools that improve and lower the cost of the supporting functions of communication, and simultaneously open up almost unlimited possibilities of satellite telecommunications of SC possible.

In recent years, the progress in the study of unbalanced plasma states has noticed. Quasi-neutral gas – is plasma, which contains both charged and neutral particles. Whereas these parts are moving, the plasma has the property to conduct electric current.

For the necessary plasma creation, the studies of the physical processes that lead to the creation of plasma environment with new properties, which meet the requirements of navigation technology are required [5]. This is possible in a gas discharge, where the plasma state and its properties are formed by a huge number of complex phenomena, depending on the applied electricity, pressure, gas type, electrode material and geometry of the discharge gap. Discharge plasma is formed just in the areas of positive poles and negative radiation discharge that glow.

According to research [6], the radiation of the plasma negative glow intensity causes higher emission of the plasma's positive column from 3 to 4 times (Fig. 1).

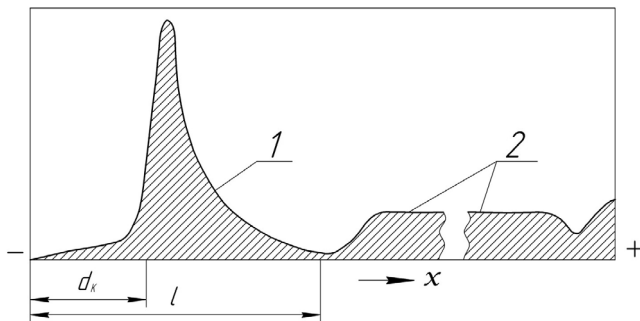


Fig. 1. The intensity distribution of discharge plasma radiation, that glow, with flat parallel gap:  
1 – emission of negative plasma;  
2 – plasma's positive column radiation

Based on studies [6] it can be concluded that as a result of the low average energy and a sufficiently high concentration of slow electrons  $N_e$  a major role in the researched function  $f(\epsilon)$  is played by the interaction of electrons. As a consequence, the electrons in the researched function  $f(\epsilon)$  in the energy range 0 – 6 eV, have maxwell distribution.

Classic plasma of negative radiation is the plasma that generated in the discharge gap glow, which consists of a hollow cathode and anode in the form of a flat disk or rod.

The cathode, which geometry has a cavity with a negative curvature, is called a hollow cathode. The most common hollow cathode is shown in the form of tubes of round,

rectangular, or two parallel plates that have common electrical contact.

Discharge, that glows with hollow cathode is significantly different from the discharge with flat parallel electrodes of electric and optical characteristics, and also outwardly. Researches of plasma with negative radiation in the hollow cathode are thoroughly conducted in [7, 8].

On appearance, discharge, which glows with the hollow cathode, represents the short discharge in the case when the anode is at distance from the hollow cathode, which does not exceed thickness of the dark faraday space, if there is sufficient gas pressure.

Steady discharge of a single emission region is a negative emission, which symmetrically located in the middle of the hollow cathode.

The cathode fall in the discharge with the hollow cathode is steeper, since the high falling. The dark crooks space has a smaller length. This leads to the fact that the electric field is larger. In such electric field, the electrons and ions acquire a huge number of kinetic energy which spends in a negative glow on the ionization and excitation of neutral atoms. Also, gas's neutral particles are excited by the atoms and ions of cathodic material action.

According to [7], in the spectrum of plasma's negative glow radiation, in the hollow cathode the large number of spark lines fits in. The highest intensity of plasma luminescence focuses on its axis, while in plasma with the negative emission flat cathode, the most intensive glow is located on the border with the dark crossover space.

Under the influence of positive ions that fall on the cathode with high energy and fast neutral atoms, which are created in the process of ions charge, on the cathode surface there is a greater secondary electron emission. The intensive radiation from the plasma negative glow is also makes a significant contribution to secondary electron emission.

The effect of the hollow cathode discharge [8] is explained by the oscillatory motions of the electrons, which penetrate plasma between two opposite dark crooks spaces.

A stream of fast electrons from one dark crooks space reaches through the double glow plasma, to the same, but contrary space. Then stops, turns back to his fields and returns to the first crooks space (Fig. 2).

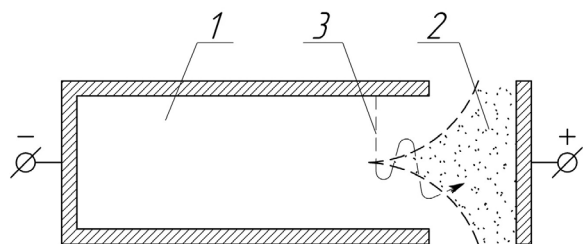


Fig. 2. The hollow cathode discharge:  
1 – dark cathode space;  
2 – plasma; 3 – trajectory of the electron, which performs the oscillatory motions in the middle of the cathode's cavity

The consequence of such repeated reciprocating movements of the electrons is to increase their ionizing and

exciting abilities, which lead to the current density increasing, the length of the dark crooks space reduction and the strength of the electric field increasing, as a result the conditions for the secondary current amplification are created.

Since the required power of the current has achieved by the drop of smaller cathode potential, primary development of intensive ionization processes and excitation in the plasma of the hollow cathode are created.

On the basis of it in the discharge with the hollow cathode, the smaller tension of burning, than abnormal cathodic fall of potential has is observed (Fig. 3.).

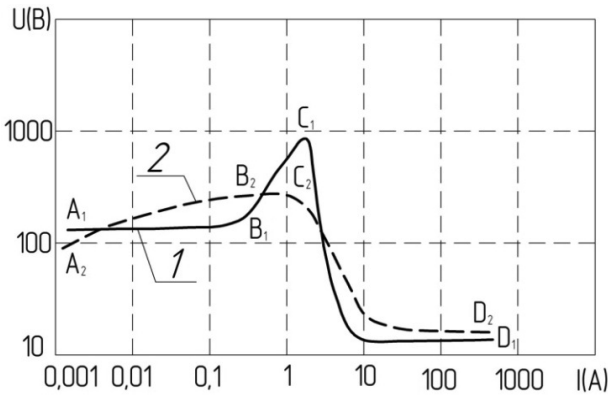


Fig. 3. Volt-ampere characteristics of the discharge that smolders, with flat (1) and hollow (2) cathodes

According to [9] for the creation of plasma with hollow cathode efficiency, oscillating motion of electrons is not as important as merge of negative radiations. In this case the part of the metastable atoms, ions and photons, which comes from plasma with negative radiation to the cathode, will considerably increase.

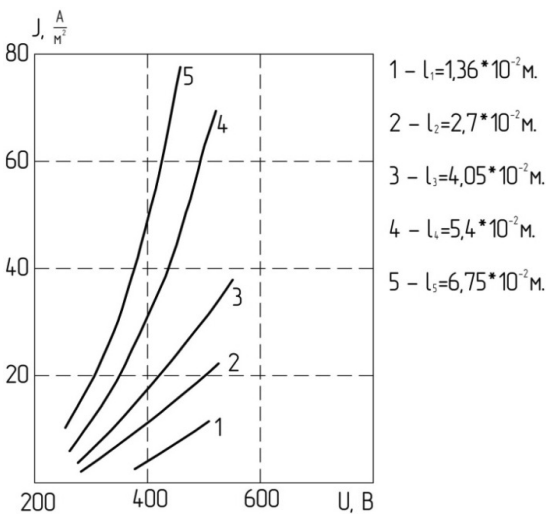


Fig. 4. Volt-ampere characteristics of the discharge with the hollow cathode of varying length in neon at  $P = 26,6 \text{ PA}$

In [10] it is shown that efficiency of the discharge with the hollow cathode is caused by exclusively significant influence of ultra-violet radiation from plasma with

negative radiation which creates intensive  $\gamma$  - processes on the cathode.

Obviously, for this purpose the conditions of discharge with a relatively high pressure suit better, when electrons unable to keep the direction of movement to perform oscillations through a large number of collisions.

On the contrary, in sources [11], claim that the photoeffect in discharge with the hollow cathode has no essential value.

According to [12] authors come to a conclusion about efficiency of the discharge with the hollow cathode on the basis of the course and type of volt-ampere characteristics of the discharge in various gases, and with different length of the hollow cathode of a cylindrical form.

Volt-ampere dependences (fig. 4) are experimentally established and testify about the following:

- 1) Curves  $\gamma=f(U)$  lie over the corresponding curve for the discharge, that glows, with the flat cathode;
- 2) Raising of a curve  $\gamma=f(U)$  with growth of  $U$  pass much more steeper, than on condition of the discharge that glows, with the flat cathode;
- 3) With increase of pressure, volt-ampere characteristics show small influence of oscillating motion of electrons;
- 4) In case of small lengths of the hollow cathode not only current, but also current density – are functions of the hollow cathode’s surface;
- 5) Optimum conditions of efficiency arise in that case when in plasma with negative radiation quanta of recombinational radiation are formed and greatly used on the cathode.

It is offered to utilize these properties of plasma using for satellite telecommunications noise stability increase.

In close proximity from the SC’s antenna, plasma with negative radiation which pushes away the ionized external stream of plasma (ions and electrons) is generated, thereby creates radio transparent environment. It occurs without interventions into the external construction of SC, and depends on geometry of plasma’s generator, pressure and gas type.

Generated noiseproof environment is not able to exist during a long period of time, whereas an external plasma membrane is not stationary regarding to SC due to hyper velocity. External plasma except electrons has positively charged ions which can be attracted to artificially created plasma. Therefore artificially created plasma is generated every few milliseconds – pulsewise. This interval is sufficient to ensure the telemetry from the SC.

Conclusions

The article considers advantages and prospects of using plasma with hollow cathode and negative radiation for the noiseproof channel of radio communication creation.

As a result of the executed researches it is established, that during achievement of effect, the discharge which glows with plasma with hollow cathode shows characteristic regularities which significantly differ from regularities of the discharge, that glows with the flat cathode.

Consider *established* that the effect in plasma with hollow cathode occurs when the best conditions for the use of fast electrons in their oscillating motion energy, the positive

ions created in  $\alpha$  - processes, fast neutral particles which are formed in a processes of recharging metastable atoms and photons are created.

Believe established that the effect in the plasma with the hollow cathode occurs in cases where there are better conditions for using the energy of fast electrons in their oscillatory motions, positive ions, created in the  $\alpha$  - processes, the fast neutral particles formed in the processes of recharge, metastable atoms and photons.

The size of a contribution of each process significantly depends on gas pressure. Efficiency of plasma with the hollow cathode is reached during the oscillating motion of electrons with small pressure, when the distance between two opposite elements on a surface of the hollow cathode is less than the length of a free run of electrons. On this condition, on border of plasma with negative radiation, dark crooks space and in the plasma, much more electrons, than in plasma with the flat cathode are formed.

At high gas pressures, that fill the working volume, a crucial role in the effectiveness of plasma is played by quanta of ultraviolet radiation and metastable atoms with negative plasma. The positive ions play a minor role, since they disappear in the processes of recombination.

Efficiency of plasma with the hollow cathode increases with increase in length of a cylindrical part of the hollow cathode. It complicates disappearance of photons and metastable atoms in processes of side diffusion. According to [12], plasma with negative radiation in the hollow cathode has very intensive processes of working gas's neutral particles excitation. As a result, it creates intensive radiation.

Creation of a system with the increased noise stability of radio signals during the passage of a frequency selective fading environment by hyper fast SC with the use of artificially created low-temperature plasma of intensive radiation, will provide the increase in security of a radio communication with an object without deterioration of the aerodynamic properties and additional costs on transformation the signals of telemetry.

## REFERENCES

1. TM Space Data Link Protocol. Recommendation for Space Data System Standards, CCSDS 130.1-G-2. Green Book. Washington, D.C.: CCSDS, November 2012.

2. Teylor M. Radio communications through the plasma at the entrance of missiles in the atmosphere. [Radiosvyaz cherez plazmu pri vhode rakety v atmosferu] // Zarubezhnaya radioelektronika. – 1968. – # 2. – S. 76 - 89.
3. Wolverton M. Piercing the Plasma: Ideas to Beat the Communications Blackout of Reentry. Scientific American. New York: Scientific American. 2009. no. 12. pp. 28–29.
4. Konyahin G. F., Melashenko A. Yu., Litvina Z. Yu. Device for the information transmission from the descent aircraft. [Ustroystvo dlya peredachi informatsii so spuskaemogo letatel'nogo apparata]. Sistemi obrobki Informatsiyi – 2001. – # 5(15). – S. 201-203
5. Crymley H. M., Elemeleus K. G. – Brit J. Appl. Phys., 1965, 16, c. 281.
6. Wilhelm J., Kind W. // Beitr. Plasmaphysik v.5, p. 395, 1965.
7. Hantzsche E., Popescu I., Lova I. Ann. d. Physik, 1969, 5, p. 308.
8. Moskalev B. I. Discharge with full cathode. [Razryad s polnyim katodom]. Energiya, M.: 1969. – 184 s.
9. Döpel R. Die Bedeutung des Ähnlichkeitsgesetzes für die Abhängigkeit der Doppelkatoden-Glimmentladung vom Gasdruck und Katodenabstand. // Wiss. Zeitschr. Der Techn. Hochschule Ilmenau 1965. V. 11. No 1. P. 9 18.
10. Rohatgi Vijay K. Electronic and Ionic Current at the Cathode of a Hollow Cathode Discharge. Journal of Applied Physics, 32, 1173 (1961).
11. Badareu E., Popescu I., Iova I. Vorgänge in den Kathoden teilen von anomalen Glimmentladungen in Helium.-Rev. Phys. Acad. RPR, 1960, v.5, N 3-4, p. 287-293.
12. Popovici C., Somesan M. On the emission spectrum of the negative glow plasma of a hollow-cathode discharge in magnetic field. // Appl. Phys. Letters. 1966. V. 8. No 5. P. 103- 105.

**Рецензент С. В. Козелков**, д-р техн. наук, проф.,  
директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій

УДК 623.983

**О. Г. ЛЕЙКО**, доктор технічних наук  
(Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря  
Сікорського», м. Київ),

**А. В. ДЕРЕПА**, кандидат технічних наук,

**О. О. КОЧАРЯН**, науковий співробітник  
(Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки, м. Київ)

## Акустичні особливості інформаційної гідроакустичної системи «морське середовище – надводний корабель – гідроакустична станція» та можливості впливу на неї

*Наведені результати досліджень щодо акустичних особливостей розміщення гідроакустичної інформації про підводну обстановку в морському середовищі, акустичних особливостей надводного корабля як носія засобів одержання гідроакустичної інформації про підводну обстановку, акустичних особливостей гідроакустичного озброєння як первинного джерела одержання гідроакустичної інформації в системі висвітлення підводної обстановки та проаналізовані можливості впливу на них з метою підвищення ефективності інформаційної гідроакустичної системи, що розглядається.*

*Приведены результаты исследований размещения гидроакустической информации о подводной обстановке в морской среде, акустических особенностей надводного корабля как носителя средств получения гидроакустической информации о подводной обстановке, акустических особенностей гидроакустического вооружения как первичного источника получения гидроакустической информации в системе освещения подводной обстановки и проанализированы возможности влияния на них с целью повышения эффективности рассматриваемой информационной гидроакустической системы.*

Одним з елементів системи державної безпеки морських держав є комплексна система висвітлення підводної обстановки в морських районах, що являють інтерес для цих держав. Вона містить два компоненти: стаціонарний та маневрений. Стаціонарний компонент утворюється мережею позиційних автоматизованих радіогідроакустичних або кабельних гідроакустичних станцій (ГАС). Маневрений компонент містить корабельні ГАС та гідроакустичні комплекси (ГАС) і авіаційні пошуково-прицільні комплекси, що включають вертолітні гідроакустичні станції та авіаційні радіогідроакустичні буї.

У військово-морських флотах провідних морських держав і, насамперед, країн НАТО найсерйозніша увага приділяється розвитку корабельного гідроакустичного озброєння (ГО). Склад корабельного ГО визначається задачами, що вирішуються, районами використання та можливостями розміщення антен і бортової апаратури на кораблях, а також наявністю сучасних гідроакустичних технологій і фінансових можливостей держави.

Проблема підвищення ефективності ГО надводних кораблів (НК) існує з моменту появи цього виду озброєння. Складність її повного рішення викликана причинами виникнення самої проблеми. Ці причини обумовлені тим, що функціонування ГО є результатом акустичної взаємодії між собою фізичних процесів, які виникають при роботі ГО в трьох фізично пов'язаних між собою складових частинах, що забезпечують його роботу: морському середовищі у вигляді водних мас Світового океану, носії ГО у вигляді НК та власне ГО у вигляді ГАС різного призначення.

Морське середовище, що являє собою повний гідроакустичний інформаційний простір, характеризується складними гідрологакустичними властивостями, які визначальним чином впливають на формування акустичного поля в цьому просторі.

НК в акустичному відношенні характеризується рядом особливостей, починаючи з того, що він розташовується на поверхні розділу двох середовищ: повітря та води – з їх акустичними властивостями, що різко відрізняються, і закінчуючи складними імпедансними властивостями та особливостями випромінювання або прийому звуку різними частинами його корпусу.

ГО має власні акустичні властивості як за принципами побудови, так і за фізичними особливостями свого конструктивного виконання.

Природно, що така розмаїтість акустичних властивостей кожної з взаємодіючих складових частин, які визначають ефективність ГО, повинна знайти відображення в наукових основах підвищення цієї ефективності. Природним є також розуміння всієї надзвичайної складності математичного опису викладених вище процесів і відсутність у різні періоди необхідного рівня знань як щодо фізичного розуміння процесів, що відбуваються, так і щодо їхнього математичного опису.

**Метою** цієї статті є дослідження акустичних особливостей розміщення гідроакустичної інформації про підводну обстановку в морському середовищі, акустичних особливостей НК як носія засобів одержання гідроакустичної інформації про підводну обстановку, акустичних

особливостей ГО як первинного джерела одержання гідроакустичної інформації в системі висвітлення підводної обстановки.

### 1. Акустичні особливості розміщення гідроакустичної інформації про підводну обстановку в морському середовищі

У морському середовищі гідроакустична інформація про стан підводної обстановки знаходиться у вигляді акустичних полів. Це можуть бути акустичні поля, фізичними характеристиками яких є акустичний тиск та коливальна швидкість. Ці поля існують у вигляді акустичних хвиль, що в залежності від умов поширення поділяють на плоскі, циліндричні та сферичні хвилі. На поширення таких хвиль в морському середовищі суттєвий вплив здійснюють гідрофізичні поля морського середовища, що характеризуються значною просторово-часовою мінливістю. У цілому ж акустичне поле в будь-якій точці морського середовища формується в результаті таких процесів поширення акустичних хвиль, як рефракція, інтерференція, дифракція, відбиття, поглинання та затухання. У кількісному відношенні наведені фізичні явища описуються за допомогою таких фізичних характеристик морського середовища, як коефіцієнти заломлення, поглинання, відбиття та розсіювання звуку морською поверхнею, водними масами та морським дном. Саме взаємодія наведених явищ між собою в морському середовищі при певному розміщенні систем «НК-ГАС» і шуканих об'єктів, що визначають стан підводної обстановки в контрольованому морському середовищі, відносно один одного та морських границь і обумовили появу акустичних особливостей цього середовища, які суттєвим чином впливають на характер розміщення гідроакустичної інформації про підводну обстановку.

Розглянемо більш детально акустичні особливості морського середовища.

Строге визначення акустичних полів у морських середовищах можливе шляхом розв'язку хвильового рівняння при заданих граничних та початкових умовах. Задача ускладнюється тим, що в реальних середовищах швидкість звуку  $c$  є функцією просторових координат  $(x, y, z)$ . У першому наближенні змінами швидкості в залежності від координат  $x$  та  $y$  можливо знехтувати. Така модель відповідає так званому шарово-неоднорідному морському середовищу, в якому швидкість звуку  $c$  є функцією тільки глибини:  $c(z) = c(h)$ . У таких умовах строгий розв'язок хвильового рівняння здійснюється методом нормальних хвиль. Але такий підхід обумовлює появу значних труднощів як математичного та обчислювального планів, так і пов'язаних з можливостями фізичної інтерпретації одержаних результатів для всього різноманіття розподілів  $c(z)$ , що мають місце в морській практиці.

Названі труднощі обумовили необхідність розробки наближених методів розрахунків акустичних полів в морських середовищах, до яких, у першу чергу, відносяться методи, що базуються на променевій

(геометричній) теорії. Ця теорія є асимптотичним розв'язком хвильової теорії і дає задовільні результати в області високих частот. Її перевагами є відносна простота, наочність, можливість оцінки акустичного поля практично для будь-яких профілів швидкості звуку  $c(z)$ . Тому вона знайшла широке застосування в практичній гідроакустиці. Основою променевої теорії акустичного поля є уявлення про акустичні промені, що перпендикулярні до хвильової поверхні [1].

Як уже відзначалося, для формування акустичних полів у морському середовищі важливе значення має швидкість звуку  $c$ . При цьому важливе не абсолютне її значення, а форма (профіль) кривої швидкості звуку в залежності від глибини  $c(h)$ , тобто розподіл градієнта швидкості звуку за глибиною  $h$ . При одному профілі  $c(h)$  дальність поширення звуку, яка і є шуканою гідроакустичною інформацією про стан підводної обстановки, може досягати сотень і навіть тисяч кілометрів, а при іншому профілі  $c(h)$  звук тієї ж частоти має дальність поширення лише одиниці або десятки кілометрів. Вид профілю  $c(h)$  різний в різних морських районах і змінюється в часі. Найбільші зміни відбуваються у верхніх шарах, де вони обумовлені сезонними та добовими змінами температури та солоності. На глибинах більше кілометра температура та солоність звичайно мало змінюються за глибиною, і зростання швидкості звуку обумовлене майже виключно зростанням гідростатичного тиску [1]. Як наслідок, на великих глибинах швидкість звуку зростає майже лінійно із збільшенням глибини. Вертикальний градієнт швидкості звуку в більшості морських районів майже в тисячу разів більший горизонтального. У результаті в першому наближенні морське середовище можливо розглядати як плоско-стратифіковане. Це означає, що його акустичні властивості змінюються тільки за глибиною та залишаються сталими в горизонтальних площинах.

Стратифікація морського середовища суттєвим чином впливає на характер знаходження гідроакустичної інформації в ньому, а відтак і на шляхи її одержання із середовища системами «НК-ГАС».

**1.1. Особливості розміщення гідроакустичної інформації в глибокому морі.** На великих глибинах розподіл швидкості поширення звуку за глибиною є дуже різноманітним [1]. У зв'язку з цим визначають два протилежні випадки поширення гідроакустичної інформації: антихвильовий і хвильовий. У першому випадку має місце інтенсивний відбір частини енергії в шарах, що лежать нижче. У другому випадку значна частина енергії гідроакустичного сигналу утримується каналом і поширюється на великі відстані.

**1.1.1. Антихвильове поширення гідроакустичної інформації.** Антихвильовому поширенню гідроакустичної інформації відповідає зменшення швидкості звуку за глибиною, обумовлене зниженням температури (рис. 1). Частіше всього це відбувається внаслідок інтенсивного прогрівання верхніх шарів морського середовища під впливом сонячної радіації. На променевій картині всі промені повертають вниз.

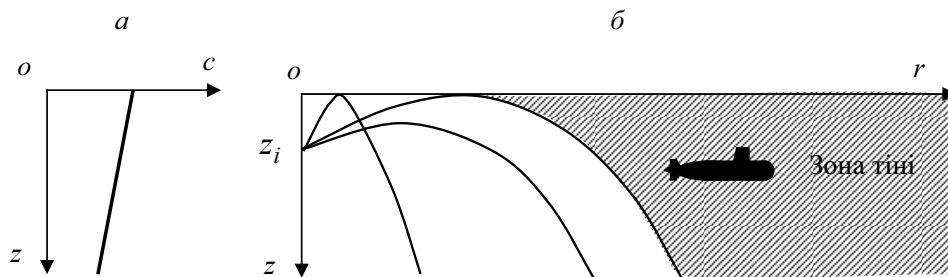


Рис. 1. Створення зони геометричної тіні при монотонному убутті швидкості звуку:  
а – профіль  $c(z)$ ; б – променева картина

Промінь, який дотикається морської поверхні, є граничним. Заштрихована на рис. 1 область являє собою зону геометричної тіні. Для типових морських умов відстань до зони тіні дорівнює всього кільком кілометрам. Зона тіні характеризується зменшенням рівня акустичного сигналу більше ніж на 100 дБ. Взагалі зона геометричної тіні не є зоною нульової інтенсивності звуку. В ідеальному випадку звук потрапляє в зону тіні внаслідок дифракції. У реальних випадках у зону тіні попадають також промені, відбиті від морського дна, розсіяні на випадкових неоднорідностях морського середовища тощо.

Можливі шляхи зміни морської області, з якої може бути отримана гідроакустична інформація, полягають в переміщенні гідроакустичної антени ГАС системи «НК-ГАС» із зони тіні або зменшенні робочої частоти ГАС.

**1.1.2. Підводний звуковий канал.** Підводний звуковий канал (ПЗК) характеризується регулярною зміною позитивної та від'ємної рефракції променів з повним внутрішнім відбиттям на горизонтах, де швидкість звуку більша мінімального значення на осі каналу. ПЗК має важливу акустичну особливість з погляду наявності гідроакустичної інформації, яка полягає в тому, що порівняно із сферичним законом поширення звукових хвиль рівень гідроакустичного сигналу в хвилеводі збільшується до 10 дБ на порядок відстані його поширення. ПЗК буває кількох типів.

**Підводний звуковий канал першого типу** (рис. 2). Утворюється в глубоководних районах, коли на якійсь глибині  $h_m$  є мінімальне значення швидкості звуку. Ця глибина називається віссю ПЗК.

При відході від осі ПЗК вгору швидкість звуку зростає в основному через підвищення температури, при відході вниз – через зростання гідростатичного тиску. Якщо гідроакустична антена системи «НК-ГАС» розміщена на осі каналу або поблизу неї, то частина звукових хвиль «захоплюється» ПЗК і поширюється в ньому, не торкаючись ні морського дна, ні морської поверхні, і таким чином не розсіюється і не поглинається його границями. Промінь, що вийшов з гідроакустичної антени, буде знову і знову повертатись до осі ПЗК. Таке поширення звуку називається хвилеводним, а гідроакустична інформація, яку воно несе, займає значний морський простір. Чим більша різниця значень швидкостей звуку на границях каналу і його осі, тим в більш широкому інтервалі кутів захоплюються промені, що збільшує значення ПЗК як ефективного джерела гідроакустичної інформації. Звичайно глибина розміщення осі ПЗК у морському середовищі складає 1000–1200 м, у тропічних зонах вона опускається до 2000 м, а в помірних широтах розміщується ближче до поверхні.

**Підводний звуковий канал другого типу** (рис. 3). Існує в менш глубоководних районах і має протяжність від морського дна до глибини  $h$ , на якій швидкість звуку становить  $c_h$ . Канальні промені не проникають вище горизонту  $z_k$ . У цю зону потрапляють лише промені, що відбиваються від морського дна.

Максимальна дальність поширення гідроакустичної інформації в ПЗК обмежується головним чином поглинанням звуку в морській воді. Акустичні сигнали, що мають достатньо низькі частоти і для яких поглинання

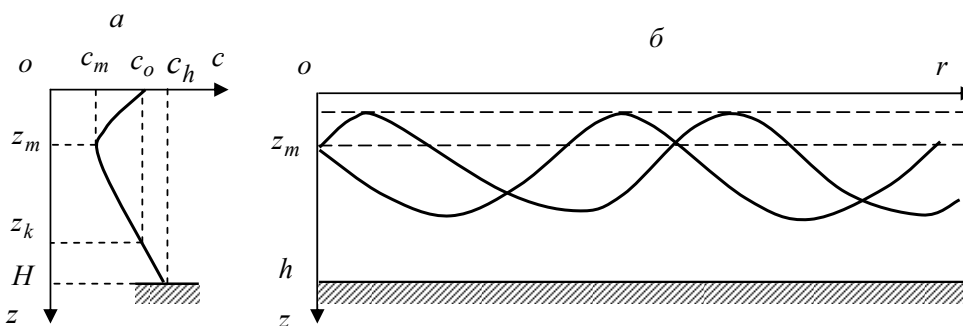
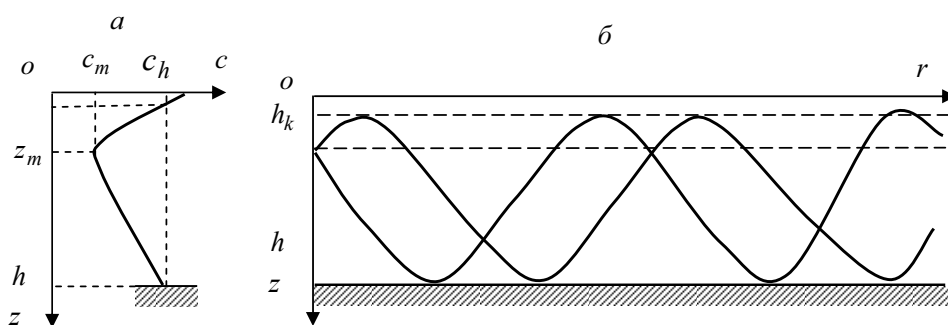


Рис. 2. Підводний звуковий канал першого типу ( $c_o < c_h$ ):  
а – профіль  $c(z)$ ; б – променева картина



Рис. 3. Підводний звуковий канал другого типу ( $c_o > c_h$ ):а – профіль  $c(z)$ ; б – променева картина

мале, можуть поширюватись на великі відстані. Таким чином, в ПЗК гідроакустична інформація існує на відстанях, що складають сотні і тисячі кілометрів.

Ряд цікавих акустичних особливостей у наявності гідроакустичної інформації в морському середовищі виникає при розміщенні гідроакустичної антени ГАС системи «НК-ГАС» поблизу морської поверхні. На променевій картині (рис. 4) чітко видно типову для ПЗК «зональну структуру» акустичного поля, створюваного системою «НК-ГАС» з такою антеною. Вона являє собою послідовність опромінених зон і зон геометричної тіні  $A_1, A_2, \dots, A_1, A_2, \dots$ , що чергуються між собою. У них не потрапляють «каналні» звукові промені. У міру наближення гідроакустичної антени до осі ПЗК протяжність зон тіні зменшується, а опромінених зон збільшується. Якщо горизонт випромінювання акустичного сигналу співпадає з віссю ПЗК, то на цьому горизонті зони тіні зникають. У точку, де розміщена приймальна гідроакустична антена ГАС поблизу від осі ПЗК, приходять ряд променів. Ця багатопроменевість є характерною особливістю поширення гідроакустичної інформації в ПЗК.

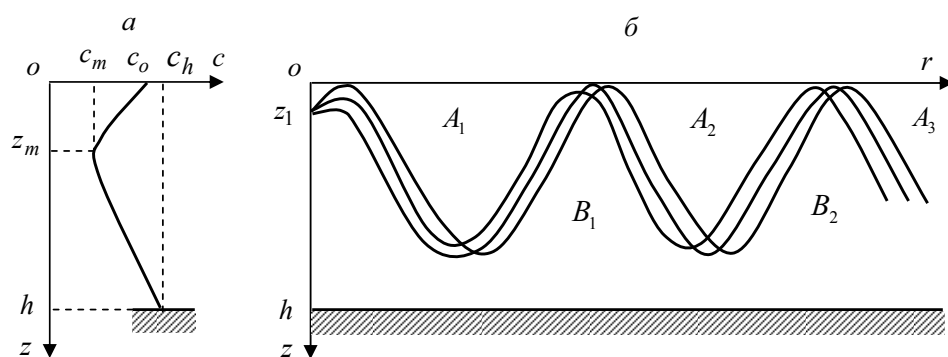
Ще однією акустичною особливістю поширення гідроакустичної інформації в ПЗК є поява зон збільшеної інтенсивності гідроакустичного сигналу, так званих зон конвергенції або дальніх зон акустичної освітленості (ДЗАО). Вони обумовлені виходом променів на малі глибини після їх повороту в глибинних шарах морського середовища та їх відповідним згущенням.

Елементами зон конвергенції для заданого розміщення гідроакустичної антени системи «НК-ГАС» є відстань до зони, її протяжність та товщина. Для типових морських умов відстань до першої зони конвергенції становить 50–70 км, до другої – 100–140 км і так далі. Протяжність першої зони може бути 10–15 км, другої – 20 км. Товщина першої зони досягає кількох сотень метрів. Розміри зон освітленості та тіні із збільшенням номера зони поступово змінюються: горизонтальна протяжність освітлених зон збільшується, а протяжність і товщина зон тіні зменшується. При сприятливих умовах може мати місце 10–11 зон конвергенції. У подальшому зони конвергенції перекриваються, утворюючи суцільну зону акустичної освітленості. Зрозуміло, що умови формування ДЗАО та їх параметри мають значний практичний інтерес з погляду розміщення гідроакустичної інформації.

**Приповерхневий звуковий канал** (рис. 5). Вісь цього каналу знаходиться на морській поверхні. Швидкість звуку зростає до глибини  $h$ , а потім починає зменшуватися.

Промені, що виходять з гідроакустичної антени ГАС системи «НК-ГАС» під кутом ковзання  $\chi_{\text{дв}}$ , який являє собою кут ковзання граничного променя, що торкається нижньої границі приповерхневого каналу, поширюються шляхом багаторазових відбиттів від морської поверхні, повертаючись вище нижньої границі каналу.

Якщо морська поверхня є рівною, то промені, що несуть гідроакустичну інформацію, утримуються в межах

Рис. 4. Типова зональна структура звукового поля в ПЗК ( $c_o > c_h$ ): $A_1, A_2, \dots$ , – опромінені зони;  $B_1, B_2, \dots$ , – зони тіні

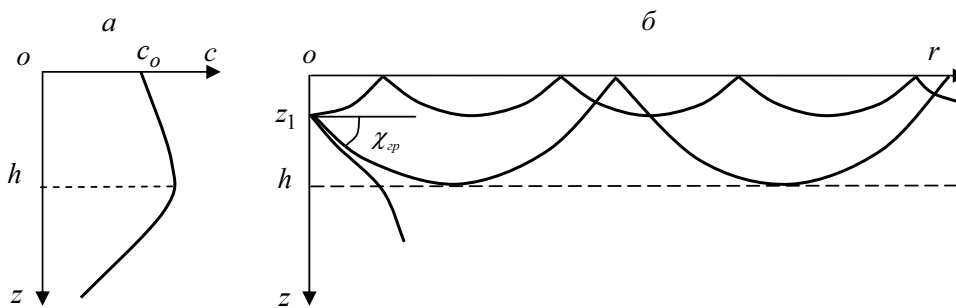


Рис. 5. Приповерхневий звуковий канал:  
а – профіль  $c(z)$ ; б – променева картина

каналу на будь-яких відстанях і обумовлюють хвильоподібне поширення гідроакустичної інформації. Якщо на морській поверхні є хвилі, то при кожному контакті променя з цією поверхнею частина гідроакустичної інформації у вигляді звукової енергії буде розсіюватись під кутом  $\chi > \chi_{\text{ад}}$ .

Цей вихід звукової енергії за межі каналу обумовить, з одного боку, ослаблення енергетичної складової гідроакустичної інформації в каналі, з іншого – появу гідроакустичної інформації в області, що лежить нижче приповерхневого каналу.

**Двохосьовий підводний звуковий канал** (рис. 6). Цей випадок поширення гідроакустичної інформації частіше всього має місце, коли є як приповерхневий, так і глибинний звукові канали.

Одна вісь каналу знаходиться на морській поверхні, друга – на глибині  $h_m$ . На променевій картині для гідроакустичної антени ГАС системи «НК-ГАС», що розміщена у верхньому каналі, промінь 2 в основному знаходиться в нижньому каналі. Деякі промені (промінь 3), що попередньо належали верхньому каналу, можуть у результаті розсіювання на хвилястій морській поверхні перейти в промені нижнього каналу.

**1.2. Особливості розміщення гідроакустичної інформації в мілкому морі.** Мілке море характеризується такими умовами поширення гідроакустичної інформації, коли будь-який промінь, що виходить з гідроакустичної антени ГАС системи «НК-ГАС», буде відбиватися від морського дна (рис. 7).

Така ситуація має місце в мілких морях особливо в літньо-осінній період, коли верхні шари морської води добре прогриваються. Оскільки при кожному відбитті від дна промінь суттєво ослаблюється, поширення гідроакустичних сигналів на великі відстані пов'язано з великими енергетичними втратами. Тому має місце високий ступінь просторово-часової мінливості рівня та фази гідроакустичного сигналу з появою завмирання до 50 дБ за 1–5 хвилин.

**1.3. Особливості розміщення гідроакустичної інформації при наявності шару стрибка.** Шар стрибка (див. рис. 5) характеризується зміною позитивної рефракції променів на різко від'ємну. Наслідком цієї зміни є зменшення рівня інформаційного гідроакустичного сигналу на 20–30 дБ при переході через горизонтальний шар стрибка. Наявність цього шару свідчить про те, що морське середовище та наявна в ньому гідроакустична інформація про стан підводної обстановки різко поділені на дві частини. Перша лежить між морською поверхнею та шаром стрибка, друга – між шаром стрибка та морським дном. Для отримання повного об'єму гідроакустичної інформації потрібно мати у складі систем «НК-ГАС» ГАС з антенами, що можуть бути розміщені на морських горизонтах, які лежать нижче шару стрибка. Ця обставина суттєво змінює як схему побудови систем «НК-ГАС», так і тактику їх використання. Необхідно зазначити, що системи «НК-ГАС» з ГАС, гідроакустичні антени яких розміщені на корпусі корабля, суттєво обмежені в можливості отримання повного об'єму

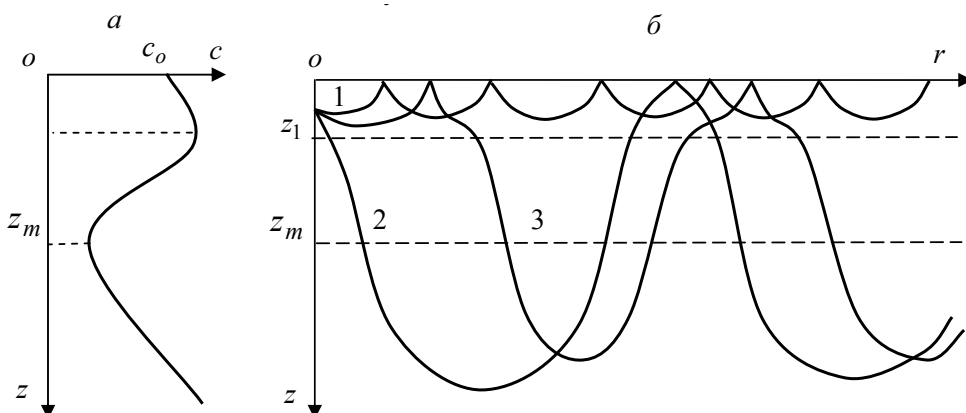


Рис. 6. Двохосьовий звуковий канал:  
а – профіль  $c(z)$ ; б – променева картина

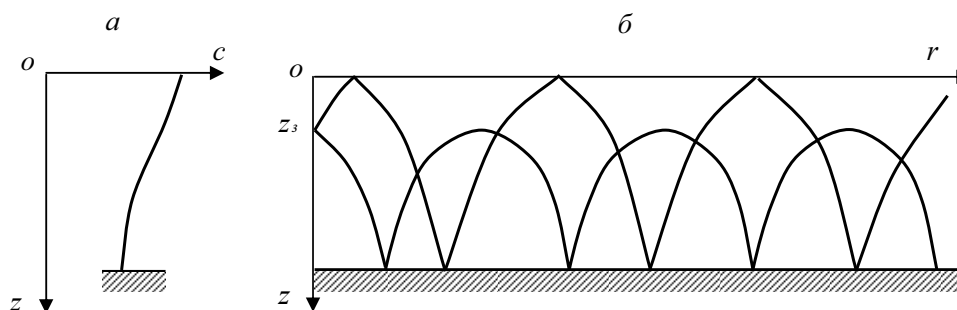


Рис. 7. Поширення звуку в мілкому морі:  
а – профіль  $c(z)$ ; б – променева картина

гідроакустичної інформації, оскільки можуть брати її лише з морського середовища між морською поверхнею та шаром стрибка.

**1.4. Особливості розміщення гідроакустичної інформації при наявності донного підсвічування.** Донне підсвічування виникає в умовах від'ємної та позитивної рефракції звукових променів з відбиттям їх від морського дна. Наслідком цієї акустичної особливості поширення гідроакустичної інформації є певне (до 5–8 дБ) збільшення гідроакустичного сигналу в зоні акустичної тіні. Практична реалізація цієї акустичної особливості існування гідроакустичної інформації в морському просторі пов'язана з певними вимогами до формування просторових характеристик ГАС систем «НК-ГАС» та структури побудови ГАС.

Таким чином, стратифікація морського середовища по глибині є суттєвим елементом, що визначає необхідність знаходження рівня розміщення горизонту морського середовища, на якому знаходиться повна гідроакустична інформація про підводному обстановку.

При реалізації технічних засобів відбирання гідроакустичної інформації з морського середовища велике значення має не тільки визначення горизонту її розміщення, але і рівень гідроакустичного сигналу, який несе цю інформацію. Цей рівень характеризується кількома акустичними особливостями. До них відносяться, по-перше, втрати, обумовлені поглинанням та розсіюванням гідроакустичних сигналів, і, по-друге, рівень власних акустичних завад у місцях розміщення гідроакустичних антен ГАС систем «НК-ГАС» на визначеному морському горизонті. Ці акустичні особливості поширюються на весь морський горизонт наявності гідроакустичної інформації.

Інтенсивність гідроакустичного сигналу, який несе на даному горизонті необхідну інформацію, спадає в процесі поширення хвиль за рахунок двох фізичних факторів: внаслідок розширення фронту хвилі та внаслідок різного роду втрат, що обумовлюють просторове згасання. Втрати на розширення фронту хвилі безпосередньо пов'язані із збільшенням поверхні, по якій розподіляється енергія гідроакустичного сигналу.

Втрати на згасання складаються з комбінації дії поглинання та розсіювання звукових хвиль сигналу. Існує кілька причин згасання звуку в морському середовищі. Основними з них є в'язкість морського середовища,

теплопровідність та молекулярна релаксація. Внаслідок в'язкості в морському середовищі має місце поглинання енергії, пропорційне квадрату частоти та коефіцієнту в'язкості в першому степені. Теплопровідність морського середовища обумовлена тим, що процес поширення звукових хвиль в ньому не є строго адіабатичним. У гідроакустичній хвилі здійснюється частково незворотне перенесення тепла від місць з більш високою температурою (область стиснення) до місць з більш низькою температурою (область розрідження). Результатом є незворотні втрати енергії хвиль. Поглинання хвиль обумовлено ще й процесами, пов'язаними з об'ємними деформаціями, результатом яких є запуск релаксацийних процесів.

До фізичних процесів, які викликають іноді значне згасання енергії гідроакустичних сигналів, відносяться також неоднорідності, що містяться в морському середовищі в зваженому стані. До них відносяться газові пухирці, біологічні об'єкти, термічні неоднорідності тощо. При цьому має місце поглинання та розсіювання звукової енергії. Особливо значним поглинанням відзначаються пухирці, власна резонансна частота радіальних коливань яких співпадає з частотою гідроакустичних сигналів, що поширюються в морському середовищі.

Рівень власних акустичних завад в місцях розміщення гідроакустичних антен ГАС систем «НК-ГАС» має три складові: шуми морського середовища; завади, створювані кораблем-носієм; власні завади, створювані ГАС.

Розглянемо першу складову. Джерела морського шуму поділяють на природні та штучні, причому різні джерела мають різні спектральні та направлені властивості. Природні шуми утворюються та визначаються станом морської поверхні та атмосфери над нею, тектонічними процесами в земній корі під морем та поведінкою морських біологічних істот. Штучні шуми утворюються рухом суден і визначаються інтенсивністю судноплавства в даному морському районі.

## 2. Акустичні особливості надводного корабля як носія засобів одержання гідроакустичної інформації про підводну обстановку

Однією із складових частин інформаційної гідроакустичної системи «морське середовище – надводний

корабель – гідроакустичне озброєння» є НК. НК також має власні акустичні особливості, що суттєвим чином впливають на можливості відбору гідроакустичної інформації про підводну обстановку з навколишнього морського середовища. Ці особливості пов'язані з умовами функціонування НК як носія ГО. До них відносяться:

- складність умов прийому та випромінювання гідроакустичного сигналу в зв'язку з розміщенням НК – носія ГО на морській поверхні;

- складність відбиваючої звук поверхні НК як тіла із складними геометрією та фізико-механічними характеристиками різних її частин;

- складність НК – носія ГО як активного джерела власних акустичних завад роботі ГО.

Розміщення НК на морській поверхні обумовлює суттєві акустичні особливості поширення гідроакустичного сигналу при його прийомі або випромінюванні ГО, розміщеному на такому носії. Це обумовлено тим, що, по-перше, морська поверхня в акустичному відношенні є поверхнею розділу середовищ «вода – повітря» і характеризується як акустично м'яка для гідроакустичного сигналу. Наслідками цієї особливості є:

- обнуління гідроакустичного сигналу на морській поверхні;

- перетворення гідроакустичної антени ГО в систему з двох дзеркально розміщених відносно морської поверхні антен з протилежними за фазою значеннями сигналів.

По-друге, в більшості випадків морська поверхня є схвильованою (шорсткою). Наслідком цього стає різне відбиття поверхнею гідроакустичних сигналів в залежності від їх робочих частот. При низьких частотах гідроакустичний сигнал не бачить цієї шорсткості, а на середніх частотах вплив шорсткості суттєво зростає і змінює статистичні характеристики гідроакустичних сигналів.

Важливу роль у випромінюванні та прийомі гідроакустичних сигналів ГО НК відіграють акустичні особливості НК, пов'язані з його складною геометричною формою поверхні та складними фізико-механічними характеристиками різних частин цієї поверхні під водою. Вплив складності геометричної форми та фізико-механічних характеристик матеріалів підводної частини НК на гідроакустичний сигнали інформаційної системи залежить від місця розташування гідроакустичної антени ГО і визначається формами поверхонь, поблизу яких розміщуються гідроакустичні антени, оскільки амплітуди та фази відбитих хвиль гідроакустичних сигналів залежать від них.

Для бортових конформних гідроакустичних антен на корпусі НК створюються спеціальні ніші, поверхні яких покривають спеціальними поглинаючими звук гідроакустичними екранами. Така конструкція ніш виключає можливість відбиття гідроакустичних сигналів, що випромінюються або приймаються гідроакустичними антенами, поверхнями ніш і забезпечує комфортні акустичні умови їх роботи. При підкільному розміщенні гідроакустичних антен звукові хвилі, що несуть

гідроакустичні сигнали, відбиваються від поверхонь його корпусу та поверхонь обтічника, в якому розміщуються гідроакустичні антени, а їх амплітуди та фази залежать як від геометричної форми підводної частини корпусу НК, так і характеристик матеріалів, з яких вона виготовлена. При такому розміщенні гідроакустичних антен ГО для створення акустичного комфорту їх роботі також може бути застосований метод покриття прилеглих до антен поверхонь підводної частини корпусу НК шарами звукопоглинаючих матеріалів. У технічному відношенні такий підхід виглядає не дуже простим, але інших підходів на сьогодні немає.

При розміщенні гідроакустичної антени ГО в обтічниках у носовій частині корпусу НК або в бульбових утвореннях у цій же частині корпусу мають місце відбиття звукових хвиль гідроакустичних сигналів від підводних поверхонь корпусу, від стінок кофердама для носового розміщення гідроакустичних антен та від поверхонь обтічників. Зменшення рівня від'ємного впливу відбитих корпусом НК та стінками обтічників звукових хвиль на інформаційний гідроакустичний сигнал здійснюється такими ж технічними прийомами, як і в наведених вище випадках.

Таким чином, акустичні особливості НК як носія ГО обумовлені тим, що його наявність поблизу гідроакустичних антен цього озброєння є причиною появи звукових хвиль, відбитих підводною частиною НК з її складними геометричною формою та фізико-механічними характеристиками матеріалів, використаних при її побудові. Ці відбиті хвилі можуть суттєво спотворювати інформаційний гідроакустичний сигнал як при його випромінюванні, так і при його прийомі.

НК як носій ГО в акустичному плані відзначається ще й тим, що є активним джерелом власних акустичних завад роботі ГО. Природно, що ці завади можуть спотворювати інформацію про стан підводної обстановки, яку несуть гідроакустичні сигнали. Джерелами виникнення цих завад є вібрації корпусних конструкцій, що обумовлюють появу підводного шуму. Види коливань, які виникають при роботі механізмів і систем корабля, та шляхи їх передачі (рис. 8) включають:

- вібрації звукового та інфразвукового діапазонів частот – по корпусах самих механізмів та систем, їх опорних конструкціях;

- вібрації через фундаментні та корпусні конструкції корабля;

- повітряний шум, який випромінюється механізмами та системами корабля, – через корабельні огороження (стілки, підволоки, переборки, палуби).

Не дивлячись на різницю в призначенні, розмірах, виду споживаної або виробленої енергій, робота корабельних машин, механізмів та систем супроводжується протіканням в них однакових фізичних процесів, що викликають вібрації та шуми.

За фізичними причинами виникнення джерела коливань поділяють на механічні, аерогідродинамічні та електромагнітні.

До основних механічних джерел коливань відносять:

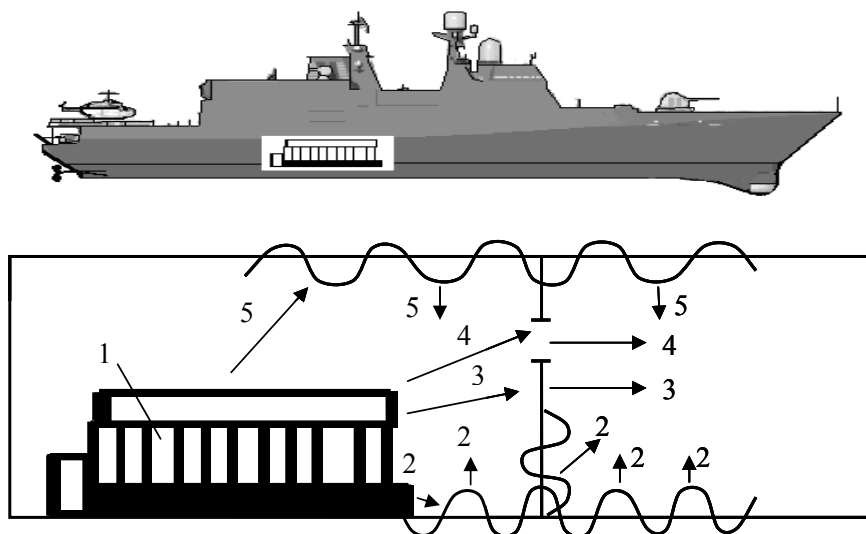


Рис. 8. Шляхи передачі повітряного та структурного звуку від шумового та віброактивного джерела в сусідні приміщення:

- 1 – вібрація звукового та інфразвукового діапазонів частот – по корпусу самого механізму, його опорних конструкціях; 2 – вібрація (структурний звук) – через фундаментні та корпусні конструкції корабля; 3 – повітряний звук, випромінюваний механізмом через корабельні огородження (переборки, підволоки, палуби); 4 – повітряний звук – через отвори, пройми, люки, вентиляційні канали; 5 – повітряний звук, який викликаний звуковою вібрацією огорожень від потужного шуму механізмів

неврівноваженість мас, що обертаються;  
неспіввісність деталей, що обертаються;  
двоєжка жорсткості роторів;  
удари тіл в кінематичних парах;  
тертя-ковзання;  
тертя-коливання.

До аерогідродинамічних джерел коливань відносять:

пульсації турбулентного потоку;  
пульсації тиску турбулентного граничного шару на обтічних поверхнях;  
пульсації тиску на лопатях гвинтів через нерівномірності потоку;  
пульсації тиску, викликані взаємодією неоднорідного потоку з обтічними тілами;  
обертання твердих тіл у середовищі;  
кавітаційні процеси в проточних частинах машин і систем;  
термічні процеси.

До електромагнітних джерел коливань слід віднести знакозмінні сили, що виникають у повітряному зазорі між ротором і статором.

Таким чином, наведений побіжний аналіз джерел акустичних завад НК – носія ГО, в умовах яких працюють гідроакустичні антени цього ГО, свідчить про необхідність пошуку як системних підходів, так і технічних шляхів та засобів зменшення їх впливу на гідроакустичні інформаційні сигнали.

Наведений аналіз акустичних особливостей НК як однієї із складових інформаційної гідроакустичної системи «морське середовище – надводний корабель – гідроакустичне озброєння» дозволяє зробити такі висновки.

По-перше, НК як носія ГО властиві значні акустичні особливості, суттєвий вплив яких на інформаційні

гідроакустичні сигнали необхідно враховувати при експлуатації інформаційної гідроакустичної системи «НК-ГО».

По-друге, ці акустичні особливості мають у своїй основі різну фізичну природу. Тому для зменшення їх впливу на систему «НК-ГО» необхідно:

розробити методи оцінки та на їх основі одержати кількісні оцінки цього впливу;

знайти технічні рішення з практичної реалізації зменшення їхнього впливу на інформаційні гідроакустичні сигнали на основі одержаних оцінок.

### 3. Акустичні особливості гідроакустичного озброєння як первинного джерела одержання гідроакустичної інформації в системі висвітлення підводної обстановки

Первинним джерелом одержання гідроакустичної інформації в системі висвітлення підводної обстановки, що включає морське середовище, надводний корабель і гідроакустичне озброєння, є гідроакустичне озброєння. Для того щоб ця інформація була виявлена в повному обсязі та без спотворень для роботи гідроакустичної антени, яка входить до складу ГО, повинні бути створені умови акустичного комфорту. На сьогоднішній день цими умовами є умови роботи гідроакустичної антени в безмежному однорідному середовищі при відсутності в ньому будь-яких джерел акустичних завад.

Наведені вище результати досліджень акустичних особливостей морського середовища та надводного корабля-носія ГО як двох складових інформаційної гідроакустичної системи свідчать про відсутність у реальній ситуації умов акустичного комфорту для роботи третьої складової цієї інформаційної системи. Більше того, не

всі складові цієї системи мають можливості введення до них змін, що могли б у подальшому якоюсь мірою створювати передумови появи акустичного комфорту роботі ГО. Дійсно, морське середовище, яке входить до складу інформаційної гідроакустичної системи, є «власником» інформації про стан підводної обстановки в будь-якому районі морської акваторії. Цю інформацію можливо знайти в ньому за допомогою ГО, використовуючи встановлені вище акустичні особливості його розміщення в морському середовищі, але вплинути якимось чином на цю складову інформаційної гідроакустичної системи неможливо.

У той же час, виходячи з наведених вище особливостей НК як другої складової інформаційної гідроакустичної системи, з погляду створення акустичного комфорту роботі ГО НК має певні можливості зменшення негативного впливу на умови роботи гідроакустичних антен. Ці можливості пов'язані як із створенням та використанням нових підходів до акустичного вдосконалення власне самого НК в частині його архітектури, застосування механізмів та систем і шляхів зменшення їх впливу як джерел власних структурних завад, так і з використанням можливостей розміщення гідроакустичних антен ГО відносно корпусу НК.

Наведений аналіз можливостей, що мають перші дві складові інформаційної гідроакустичної системи в плані створення акустичного комфорту роботі гідроакустичних антен ГО, дозволяє зробити висновок про те, що вони є важливими, але не визначальними. Визначальними в цьому плані залишаються лише ті можливості, що безпосередньо пов'язані з ГО системи «НК-ГО». Основою їх появи та реалізації є врахування впливу акустичних особливостей умов функціонування гідроакустичних антен в інформаційних гідроакустичних системах «морське середовище – надводний корабель – гідроакустичне озброєння» на їх ефективність. При цьому ефективність систем «НК-ГО» визначається [2, 3] як ступінь технічного пристосування даної системи до виконання поставленої задачі.

Дійсно, саме ГО та особливості його акустичних характеристик дозволяють адаптувати ГО до акустичних особливостей і морського середовища, і надводного корабля-носія ГО. Для цього ГО має значний арсенал технічних характеристик. З погляду адаптації ГО до акустичних особливостей умов розміщення гідроакустичної інформації в морському середовищі слід віднести таке.

По-перше, гідроакустичні антени, що входять до складу ГО, повинні мати можливість бути розміщеними на тому морському горизонті, на якому знаходиться інформація. Для забезпечення цієї можливості необхідно мати в складі ГО два типи гідроакустичних антен: стаціонарно розміщені на корпусі НК і такі, що можуть бути розміщеними на будь-якому морському горизонті, так звані антени змінної глибини (АЗГ). Особливістю АЗГ є необхідність витримувати значний гідростатичний тиск, у зв'язку з чим формування необхідних акустичних характеристик ГО з такими гідроакустичними антенами суттєво ускладнюється.

По-друге, направлені властивості ГО повинні бути узгоджені з акустичними особливостями морського середовища. Зокрема, характеристики направленості ГО з гідроакустичними антенами, розміщеними на корпусі НК, у вертикальній площині повинні бути відхилені вниз від морської поверхні, щоб зменшити її вплив на них. При прийомі ГО з гідроакустичними антенами змінної глибини багатопроменевий інформаційний гідроакустичний сигнал їх антени у вертикальній площині повинні мати віяло характеристик направленості, кожна з яких повинна бути узгоджена за параметрами з відповідними променями.

При роботі гідроакустичних антен ГО поблизу морської поверхні або морського дна пристосованість системи «НК-ГО» до цих акустичних особливостей морського середовища може бути реалізована шляхом, в якому першим підходом є визначення впливу вказаних границь морського середовища на направлені акустичні властивості ГО, а другим – врахування їх таким чином, щоб ці направлені властивості ГО в присутності названих морських границь були такими ж, як і при роботі ГО в умовах безмежного середовища. Такі акустичні особливості ГО технічно можуть бути реалізовані шляхом синтезу характеристик гідроакустичних антен відповідно до названих умов їх експлуатації.

Таким чином, врахування акустичних особливостей умов розміщення гідроакустичної інформації, по-перше, технічно можливе лише в третій складовій інформаційної гідроакустичної системи «морське середовище – надводний корабель – гідроакустичне озброєння», і, по-друге, полягає в створенні в цій складовій таких акустичних особливостей, які б відповідали умовам акустичного комфорту роботи гідроакустичних антен ГО. Врахування акустичних особливостей другої ланки названої інформаційної гідроакустичної системи при виявленні гідроакустичної інформації можливо реалізувати двома технічними напрямками. Перший з них, пов'язаний власне з самим НК – носієм ГО, був розглянутий вище. Другий напрям пов'язаний з ГО і полягає в створенні таких акустичних особливостей ГО, які б, як і у випадку морського середовища, забезпечували умови акустичного комфорту роботі гідроакустичних антен ГО.

Зокрема, в гідроакустичних антенах ГО, що розміщуються в носовій частині корпусу НК у секторі кутів у напрямі розміщення гвинтів НК, формування характеристик направленості недоцільне. Характеристики направленості гідроакустичних антен в інших напрямках повинні мати малі рівні бокових пелюсток. Направлені властивості АЗГ ГО повинні мати малий рівень бокових пелюсток характеристик направленості в секторах кутів у напрямі розміщення гвинтів корабля-носія ГО. Всі ці вимоги пов'язані з формуванням у ГО характеристик направленості спеціальної форми та відображають акустичні особливості ГО.

Таким чином, збільшення ефективності системи «НК-ГО» шляхом врахування акустичних особливостей другої складової інформаційної гідроакустичної системи може бути досягнуто не тільки завдяки змінам в

архітектурі НК і його характеристиках як носія ГО, а й за допомогою створення певних акустичних особливостей при технічних реалізаціях самого ГО.

**Висновки.** На сучасному етапі розвитку ГО НК інформаційна гідроакустична система, яка включає до себе три незалежні компоненти у вигляді морського середовища, НК та ГО, повинна розглядатись як єдина система, всі складові якої пов'язані між собою у функціональному відношенні при вирішенні поставленої бойової задачі. Кожна із складових цієї інформаційної гідроакустичної системи має свій набір акустичних особливостей, що вирішальним чином впливають на пошук та відбір гідроакустичної інформації, необхідної для вирішення поставленої задачі. Саме спільний розгляд з єдиних методологічних позицій цих акустичних особливостей кожної із складових частин інформаційної гідроакустичної системи дозволяє встановити їхній вплив на характеристики системи «НК-ГО» і врахувати його з метою збільшення ефективності цієї системи.

Встановлені та проаналізовані акустичні особливості умов функціонування системи «НК-ГО» відносно кожної із складових інформаційної гідроакустичної системи: морського середовища, НК і ГО – та їхній вплив на побудову і характеристики системи «НК-ГО».

Показано, що підвищення ефективності системи «НК-ГО» може бути реалізовано значною мірою шляхом адаптації акустичних особливостей ГО до акустичних особливостей морського середовища та надводного корабля-носія ГО та певною мірою – за рахунок зміни акустичних особливостей НК та їхнього впливу на ГО.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Ветер и волны в океанах и морях : справоч. данные / под. ред. И. Н. Давидана, Л. И. Лопотухина. Л. : Транспорт, 1974. 264 с.
2. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника : состояние и актуальные проблемы. СПб. : Наука, 2004. 410 с.
3. Терминологический словарь-справочник по гидроакустике / Р. Х. Бальян, Э. В. Батаногов, А. В. Богородский [и др.]. Л. : Судостроение, 1989. 368 с.

**Рецензент О. В. Коржик**, д-р техн. наук, проф.  
(Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»)

УДК 623.55.021:621.396.96.3

**С. М. РОЗГОНАЄВ,***кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,***П. П. ЧАБАНЕНКО,** *доктор воєнних наук, професор, заслужений діяч науки й техніки України**(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)*

## Підвищення інформативності й інваріантності класифікаційних ознак перевипромінюваних радіолокаційних сигналів надводним кораблем

*Проведено дослідження з підвищення ефективності класифікації й визначення головної цілі за сигналами радіолокаційних датчиків при невизначеному ракурсі опромінення надводного корабля.*

*Ключові слова: ефективна поверхня розсіювання, надводний корабель, інваріантність, амплітуда, тривалість імпульсів.*

*Проведены исследования по повышению эффективности классификации и выделения главной цели радиолокационными датчиками с учетом ракурса облучения корабля.*

*Ключевые слова: эффективная поверхность рассеивания, надводный корабль, инвариантность, амплитуда, длительность импульсов.*

Класифікація морських цілей за сигналами радіолокаційного датчика (радіолокаційної станції виявлення, радіотехнічного пристрою самонаведення протикорабельної ракети з імпульсним випромінюванням) ускладнена з низки причин. При форсованих характеристиках датчика основні з них такі:

сильний вплив підстильної морської поверхні, характер схвильованості якої від штилю до шторму заздалегідь невідомий, та інших природних перешкод;

залежність параметрів перевипромінюваного надводним кораблем сигналу від ракурсу опромінення, курсу й орієнтації корпусу.

У зв'язку з цим обробка сигналу ускладнюється суперечливими умовами врахування невизначеного розміщення корабля на момент його опромінення й сукупністю випадкових факторів, що впливають на параметри відбитого сигналу.

Характерною рисою надводних кораблів (НК) є співвідношення його розмірів у перерізах, проілюстрованих на рис. 1.

При опроміненні з траверзних курсових кутів (по осі  $a - a$ ) час проходження фронту електромагнітної хвилі по кораблю малий, а площа проекції корабля на поверхню її фронту (вид збоку) більша. При опроміненні з курсових/кормових напрямків (по осі  $b - b$ ) час проходження фронту хвилі більше, але площі проекції корабля на її фронт (вид з корми/носа) менше. У проміжних положеннях корабля ці величини змінюються так, що при збільшенні однієї зменшується інша.

Архітектури надводних кораблів різні, площі їхніх геометричних проекцій не збігаються з ефективною поверхнею розсіювання, а тривалість відбитих сигналів складається з тривалості зондувального імпульсу й дошки на тангенціальний розмір цілі (у напрямку зондування). Тому фізична картина явища істотно складніша геометричних співвідношень і відзначену закономірність впливу конструкції надводних кораблів важко виявити у перевипромінюваних ними сигналах [1] та використати для досягнення інваріантності комбінації амплітуди  $U$  і тривалості  $T$  імпульсів від цілі при їхній обробці. Так, пропозиція підсумувати амплітуду  $U$  з тривалістю імпульсу  $T$  на фіксованому рівні половини його амплітуди ( $U + km_{0,3}$ ) дало тільки частковий й явно недостатній ефект. Це ж стосується до інших емпіричних спроб запропонувати інваріантну їхню комбінацію. Незважаючи на відсутність явного ефекту, дослідження в цьому відношенні актуальні, тому що геометричні пропорції корпусу НК типові й повинні проявляти себе в параметрах перевідбитих сигналів радіолокаційних датчиків, особливо при малих кутах місця й коротких імпульсів зондування НК, побудованих за сучасною технологією.

**Оцінювання інформації про клас НК у перевипромінюваних сигналах.** Підвищення ефективності класифікації й виділення головної цілі пов'язане з оптимальним накопиченням прийнятих від цілі сигналів, формуванням достатніх статистик. Відомо, що при певних законах розподілу  $\omega_j(x)$  випадкової ознаки  $X$  об'єкта класу  $j$  логарифм відносної



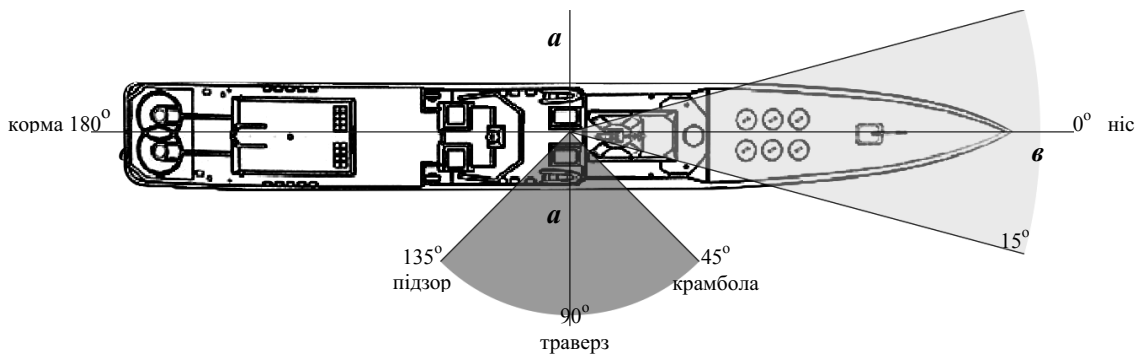


Рис. 1. Вид зверху й сектори курсових кутів багатоцільового корабля

правдоподібності  $\lambda_{12}(x_i) = \ln[\varpi_1(x)/\varpi_2(x)]$ . При деякому об'ємі  $n$  вибірки  $i = \overline{1, n}$  даних накопичення інформації здійснюється підсумовуванням значень  $\lambda_{12}(x_i)$  щодо об'єкта невідомого класу із щільністю ознаки  $\omega_j(x)$ :

$$\Delta I_j^* = \sum_{i=1}^n \omega_j(x) \ln \frac{\varpi_1(x)}{\varpi_2(x)}.$$

Граничним виразом цієї суми при  $n \rightarrow \infty$  і  $j = 1$  буде спрямована розбіжність [2]

$$\Delta I_{12} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \omega_1(x_i) \ln \frac{\varpi_1(x_i)}{\varpi_2(x_i)} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(x) \ln \frac{\varpi_1(x)}{\varpi_2(x)} dx, \quad (1)$$

яку запишемо у вигляді різниці

$$\Delta I_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(x) \ln \varpi_1(x) dx - \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(x) \ln \varpi_2(x) dx.$$

У цьому виразі перший інтеграл характеризує [3] кількість інформації, яку отримуємо при повному з'ясуванні класу 1 об'єкта 1. Другий інтеграл можливо інтерпретувати як кількість змістовної інформації в об'єкті 1 про об'єкти класу 2. Їхня різниця – міра інформації, що за класифікаційною ознакою  $X$  об'єкт класу 1 відрізняє від об'єкта класу 2. Аналогічно спрямована розбіжність

$$\Delta I_{21} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(x) \ln \frac{\varpi_2(x)}{\varpi_1(x)} dx \quad (2)$$

може інтерпретуватися як кількість інформації, що за цією класифікаційною ознакою об'єкт класу 2 відрізняє від об'єкта класу 1.

Сума спрямованих розбіжностей – міра, що досліджена С. Кульбаком, задовольняє двом першим аксіомам відстані (позитивності й симетрії), але не задовольняє аксіомі трикутника, і тому названа ним “статистичною відстанню” [2]:

$$I = \Delta I_{12} + \Delta I_{21} \quad (3)$$

Стосовно завдання класифікації морських цілей будемо інтерпретувати цю міру як “розрізнявальну інформацію” ознаки  $X$  при порівнянні класів НК. В якості ознаки доцільно прийняти амплітуду  $U$  і тривалість імпульсу  $T$  перевіреного ціллю радіолокаційного

імпульсу, застосовуючи до них міру (3) для оцінки їхньої інформативності.

При допущенні про незалежність величин  $U$ ,  $T$  спільний їхній розподіл  $\varpi(u, \tau) = \varpi(u) \cdot \varpi(\tau)$  має вигляд

$$\varpi(u, \tau) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_\tau} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u-m_u)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(\tau-m_\tau)^2}{\sigma_\tau^2}\right]}, u \in U, \tau \in T, \quad (4)$$

де  $m_u, m_\tau$  – математичне сподівання випадкових величин  $U, T$ ;  $\sigma_u^2 = D_u, \sigma_\tau^2 = D_\tau$  – їх дисперсії.

Клас НК може оцінюватися попарним перебором можливих класів цілей. При двох класах  $j = 1, 2$  спрямовану розбіжність (1) запишемо як

$$\Delta I_{12} = \iint_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u, \tau) \ln \frac{\varpi_1(u, \tau)}{\varpi_2(u, \tau)} du d\tau. \quad (5)$$

Тут

$$\ln \frac{\varpi_1(u, \tau)}{\varpi_2(u, \tau)} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(u-m_{u2})^2}{D_{u2}} + \frac{(\tau-m_{\tau2})^2}{D_{\tau2}} - \frac{(u-m_{u1})^2}{D_{u1}} - \frac{(\tau-m_{\tau1})^2}{D_{\tau1}} + \ln \frac{D_{u2}D_{\tau2}}{D_{u1}D_{\tau1}} \right],$$

де індекси 1, 2 співвіднесені параметрам розподілів ознак порівнюваних класів.

Після перетворень одержимо

$$\ln \frac{\varpi_1(u, \tau)}{\varpi_2(u, \tau)} = \frac{D_{u1}-D_{u2}}{2D_{u1}D_{u2}} u^2 + \frac{m_{u1}D_{u2}-m_{u2}D_{u1}}{D_{u1}D_{u2}} u + \frac{D_{\tau1}-D_{\tau2}}{2D_{\tau1}D_{\tau2}} \tau^2 + \frac{m_{\tau1}D_{\tau2}-m_{\tau2}D_{\tau1}}{D_{\tau1}D_{\tau2}} \tau + c_{u1} + c_{\tau1}, \quad (6)$$

де

$$c_{u1} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_{u2}^2}{D_{u2}} - \frac{m_{u1}^2}{D_{u1}} + \ln \frac{D_{u2}}{D_{u1}} \right), c_{\tau1} = \frac{1}{2} \left( \frac{m_{\tau2}^2}{D_{\tau2}} - \frac{m_{\tau1}^2}{D_{\tau1}} + \ln \frac{D_{\tau2}}{D_{\tau1}} \right).$$

Позначимо параметричні співмножники при змінних у (6) через  $a_{u1}, b_{u1}$  і  $a_{\tau1}, b_{\tau1}$  відповідно порядку і запишемо простіше:

$$\ln \frac{\varpi_1(u, \tau)}{\varpi_2(u, \tau)} = (a_{u1}u^2 + b_{u1}u + c_{u1}) + (a_{\tau1}\tau^2 + b_{\tau1}\tau + c_{\tau1}) = \varphi(u) + \varphi(\tau) . \quad (7)$$

Введемо (7) в (5):

$$\Delta I_{12} = \iint_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u, \tau) \varphi_1(u) du d\tau + \iint_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u, \tau) \varphi_1(\tau) d\tau du, \quad (8)$$

де перший інтеграл перетвориться в такий спосіб:

$$I_{u1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u) (a_{u1}u^2 + b_{u1}u + c_{u1}) du \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(\tau) d\tau = a_{u1}(m_{u1}^2 + D_{u1}) + b_{u1}m_{u1} + c_{u1}, \quad (9)$$

і аналогічно другий інтеграл

$$I_{\tau1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(\tau) (a_{\tau1}\tau^2 + b_{\tau1}\tau + c_{\tau1}) d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u) du = a_{\tau1}(m_{\tau1}^2 + D_{\tau1}) + b_{\tau1}m_{\tau1} + c_{\tau1}. \quad (10)$$

Отже, спрямована розбіжність (8) у вигляді суми доданків характеризує інформацію в першому класі ( $j = 1$ ) морських цілей про другий їхній клас ( $j = 2$ ), яка міститься в амплітуді  $U$  імпульсу і його тривалості  $T$ :

$$\Delta I_{12} = I_{u1} + I_{\tau1} . \quad (11)$$

Аналогічно одержимо сумарну інформацію у вигляді спрямованої розбіжності

$$\Delta I_{21} = I_{u2} + I_{\tau2} , \quad (12)$$

яка характеризує внесок амплітуди й тривалості імпульсу у відмінність другого класу ( $j = 2$ ) морських цілей від першого ( $j = 1$ ) їхнього класу. Тут вирази для доданків збігаються з (9) і (10) при заміні індексу 1 на індекс 2. Це ж стосується й індексів при параметрах у (6).

Додавання (11) з (12) дає **розрізнявальну інформацію про порівнювані класи морських цілей, яка потенційно міститься в амплітуді й тривалості перевипромінюваних ними зондувальних імпульсів**, що може бути представлена, на відміну від (3), так:

$$I = (I_{u1} + I_{u2}) + (I_{\tau1} + I_{\tau2}) = I_u + I_\tau . \quad (13)$$

Тут

$$I_{uj} = a_{uj}(m_{uj}^2 + D_{uj}) + b_{uj}m_{uj} + c_{uj} , \quad j = 1, 2 \quad (14)$$

де коефіцієнти визначені в (6) для  $j = 1$ , а при  $j = 2$  виконується переіндексація параметрів. Підстановкою виразів коефіцієнтів у (14) одержимо

$$a_{u1}(m_{u1}^2 + D_{u1}) + a_{u2}(m_{u2}^2 + D_{u2}) = [(D_{u1} - D_{u2})(m_{u1}^2 + D_{u1}) + (D_{u2} - D_{u1})(m_{u2}^2 + D_{u2})] / 2 D_{u1} D_{u2} = [(D_{u1} - D_{u2})(m_{u1}^2 - m_{u2}^2) + (D_{u2} - D_{u1})^2] / 2 D_{u1} D_{u2} ;$$

$$b_{u1}m_{u1} + b_{u2}m_{u2} = [(m_{u1}D_{u2} - m_{u2}D_{u1})m_{u1} + (m_{u2}D_{u1} - m_{u1}D_{u2})m_{u2}] / D_{u1}D_{u2} = (m_{u1}D_{u2} - m_{u2}D_{u1})(m_{u1} - m_{u2}) / D_{u1}D_{u2};$$

$$C_{u1} = C_{u2} = 0 .$$

Підставляючи ці вирази в (14) і підсумовуючи їх, після перетворювання знаходимо розрізнявальну інформацію, яка міститься в **амплітуді** імпульсів про порівнювані класи цілей у мірі Кульбака при нормальному їхньому розподілі:

$$I_u = \frac{(m_{u1} - m_{u2})^2(D_{u1} + D_{u2}) + (D_{u1} - D_{u2})^2}{2D_{u1}D_{u2}}, u \in U. \quad (15)$$

Такі ж перетворення дають  $I_\tau$ , співпадаючи з (15) при заміні  $u$  на  $\tau \in T$  як міру інформації про класи цілей, яка міститься в **тривалості** перевідбитих імпульсів. Отримані вирази вводяться в (13), чим визначається потенційна інформація про порівнювані класи надводних кораблів, що міститься в амплітуді  $U$  і тривалості  $T$  перевипромінюваних ними радіолокаційних імпульсів:  $I = I_u + I_\tau$ .

Перепишемо (15) без буквених індексів:

$$I(m, D) = \frac{(m_1 - m_2)^2(D_1 + D_2) + (D_1 - D_2)^2}{2D_1D_2} . \quad (16)$$

При рівних дисперсіях класифікаційної ознаки з (16) треба

$$I(m) = \frac{(m_1 - m_2)^2}{D} , \quad (17)$$

а в іншому крайньому випадку – рівності математичних сподівань ознаки – має місце

$$I(D) = \frac{(D_1 - D_2)^2}{2D_1D_2} . \quad (18)$$

Ці вирази можливо використати для зіставлення з повною розрізнявальною інформацією класифікаційної ознаки  $I(m, D)$  параметричних складових: *систематичної*  $I(m)$  і *випадкової*  $I(D)$ . Вирази для них несуперечливо інтерпретуються згідно з інтуїтивним поданням про характер досліджуваного явища, його природу.

Зазначимо, що в акваторії Чорноморського й Азовського морів *більше 80%* становлять кораблі двох класів: корвет і фрегат (і співвіднесені до цих класів НК, за винятком патрульних кораблів). Тому найціннішим для практики є результати експериментального дослідження характеристик надводних кораблів цих двох класів.

**Виявлення квазіоптимальної комбінованої ознаки класифікації НК.** Зниженню ступеня залежності класифікаційної ознаки від ракурсу опромінення НК може послужити перехід до використання функції випадкових амплітуди й тривалості імпульсів морської

цілі як яка відзначалася комбінація  $Z = U + kT_{0,5}$ , запропонована В.Барсковим і реалізована в авіації ВМС із частковим ефектом. При цьому завдання оцінки інформативності цієї комбінації не ставилося.

Вище показано, що розрізнявальна інформація (13) як гранична форма достатніх статистик є сумою інформації про клас цілі, що міститься у вибірці амплітуд  $I_u$  і тривалостей  $I_\tau$  перевипромінюваних імпульсів. Відомо також, що достатня статистика є сумою функцій від значень випадкових величин. У розглянутому випадку нормально розподілених випадкових ознак  $U$  й  $T$  вище показано, що достатні статистики формуються на основі логарифма відношення правдоподібності у вигляді суми (7) двох поліномів, яку запишемо без вільних членів:

$$(a_u u^2 + a_\tau \tau^2) + (b_u u + b_\tau \tau) = Z(u, \tau). \quad (19)$$

Комбінація  $Z(u, \tau)$  задовольняє вимозі збереження всієї інформації, що міститься в одиничній вибірці даних системи незалежних нормально розподілених ознак ( $U, T$ ). При цьому в другій дужці підсумовуються зважені значення змінних, а в першій – зважені їхні квадрати. З урахуванням конструктивних особливостей надводних кораблів (рис. 1) правдоподібно очікувати меншого ступеня залежності  $Z$  від ракурсу їхнього опромінення, чим у частинних змінних  $u$  і  $\tau$ . Ще однією перевагою комбінації (19) перед лінійною функцією  $U + kT$  є визначеність коефіцієнтів у (6), що обчислюються через моментні характеристики випадкових амплітуди й тривалості перевипромінювальних кораблями порівнюваних класів радіолокаційних імпульсів. При відомих параметрах розподілів значення цих коефіцієнтів можливо обчислити заздалегідь.

Накопичення комбінації ознак імпульсів від цілі здійснюється підсумовуванням її значень з нормуванням по обсягу вибірки даних:

$$Z_n = a_u \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2 + a_\tau \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i^2 + b_u \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (20)$$

де нормовані по  $n$  суми – достатні статистики (оцінки других і перших моментів амплітуди й тривалості імпульсів від корабля, клас якого визначається).

#### Висновки:

1. Таким чином, запропонована комбінована ознака класифікації НК відрізняється від раніше запропонованих тим, що накопичується вся інформація про клас цілі, яка міститься у вибірці системи ( $U, T$ ) ознак, і при цьому має часткову інваріантність до ракурсу опромінення корабля.

2. Продовження досліджень відносно інформативності й інваріантності параметрів перевипромінюваних радіолокаційних сигналів надводним кораблем пов'язане з натурними експериментами.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Китай Я. Г., Кряжевський О. П., Кузьмін В. О. Пристрої виявлення і розпізнавання морських цілей у радіотехнічних системах. Севастополь : СВМІ, 2003. 43 с.
2. Кульбак С. Теория информации и статистики. М., 1967. 408 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.

**Рецензент В. І. Слюсар**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

УДК 623.486.016

**М. О. ШИШАНОВ,***доктор технічних наук, професор,***А. В. ГУЛЯЄВ,** *кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник,***О. В. ЗУБАРЄВ,** *кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник**(Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, м. Київ),***М. М. ШЕВЦОВ***(Озброєння Збройних Сил України, м. Київ)*

## Методологія обґрунтування тактико-технічних вимог до технічних засобів відновлення

*Запропонований методичний підхід до формування тактико-технічних вимог до технічних засобів відновлення озброєння та військової техніки, що дозволяє обґрунтувати тенденції розвитку та принципи будови рухомих засобів технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки.*

*Предложен методический подход к формированию тактико-технических требований к техническим средствам восстановления вооружения и военной техники, позволяющий обосновать тенденции развития и принципов построения подвижных средств технического обслуживания и ремонта вооружения и военной техники.*

Розвиток системного підходу, проникнення прогресивних ідей у сферу створення нових зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) зумовило початок нового етапу удосконалення системи відновлення. Цей етап почався з 1991 року і продовжується до теперішнього часу.

Аналіз досвіду сучасних воєнних конфліктів, і особливо, проведення антитерористичної операції на сході України та врахування виявлених недоліків спонукає до подальшого удосконалення системи відновлення ОВТ. Тобто разом з реалізацією накопиченого досвіду сьогоднішній період характеризується постійним намаганням привести засоби технологічного оснащення у відповідність до ОВТ, що швидко розвивається й якісно змінюється. Різке якісне удосконалення об'єктів ремонту на теперішній час призвело до значного ускладнення машин та насичення їх системами, де використовуються останні на теперішній час досягнення науково-технічної думки. Враховуючи перспективи розвитку ОВТ та підвищені вимоги, що висуваються до системи технічного обслуговування і ремонту (ТОіР), гостро постала необхідність у розробленні нового покоління універсальних та уніфікованих (модульних) рухомих технічних засобів обслуговування, діагностики, ремонту та евакуації. Вітчизняний і зарубіжний досвід [1–3] показує, що парк рухомих технічних засобів обслуговування (діагностики, ремонту та евакуації) з появою нового сучасного ОВТ потребує удосконалення з метою підтримки постійної бойової готовності існуючого і перспективного ОВТ до виконання завдань за призначенням.

Однак умови експлуатації засобів ТОіР не визначені, відсутній єдиний підхід до визначення часу і місця проведення робіт з обслуговування і ремонту, їхнього об'єму і змісту, а також не визначена єдина методологія їхньої побудови, наявні технічні і виробничі засоби не відповідають сучасним вимогам; інструмент, що використовується для ТОіР, як правило, повинен бути стандартизований. Виходячи із зазначеного, виникає необхідність формування єдиних поглядів на формування вимог до рухомих засобів ТОіР (РЗТОіР).

Визначення тактико-технічних вимог (ТТВ) до проектування технічних засобів відновлення (ТЗВ) полягає у формулюванні основних характеристик рухомих ремонтних майстерень (РРМ), верстатів, пристосувань, інструментів і т. д. Мета розроблення ТТВ до ТЗВ полягає в підвищенні ефективності проведення ТОіР частинами технічного забезпечення (ТхЗ) при мінімальній вартості. Ефективність системи відновлення (СВ) ОВТ багато в чому визначається якістю ТЗВ. Тому вже на стадії визначення ТТВ виникає задача створення передумов для випуску високоякісних з підвищеним технічним рівнем зразків ТЗВ, що надходять на укомплектовування ремонтних органів. Зростання технічного рівня та якості виготовлення ТЗВ дозволяє зменшувати трудомісткість робіт особового складу, економити витратні матеріали і підвищувати якість військового ремонту ОВТ.

Визначення ТТВ до перспективних ТЗВ передбачає розгляд таких питань, як обґрунтування номенклатури ТЗВ, класифікація ТЗВ, структура ТТВ. Множина вимог, що пред'являються до ТЗВ, складність і невизначеність

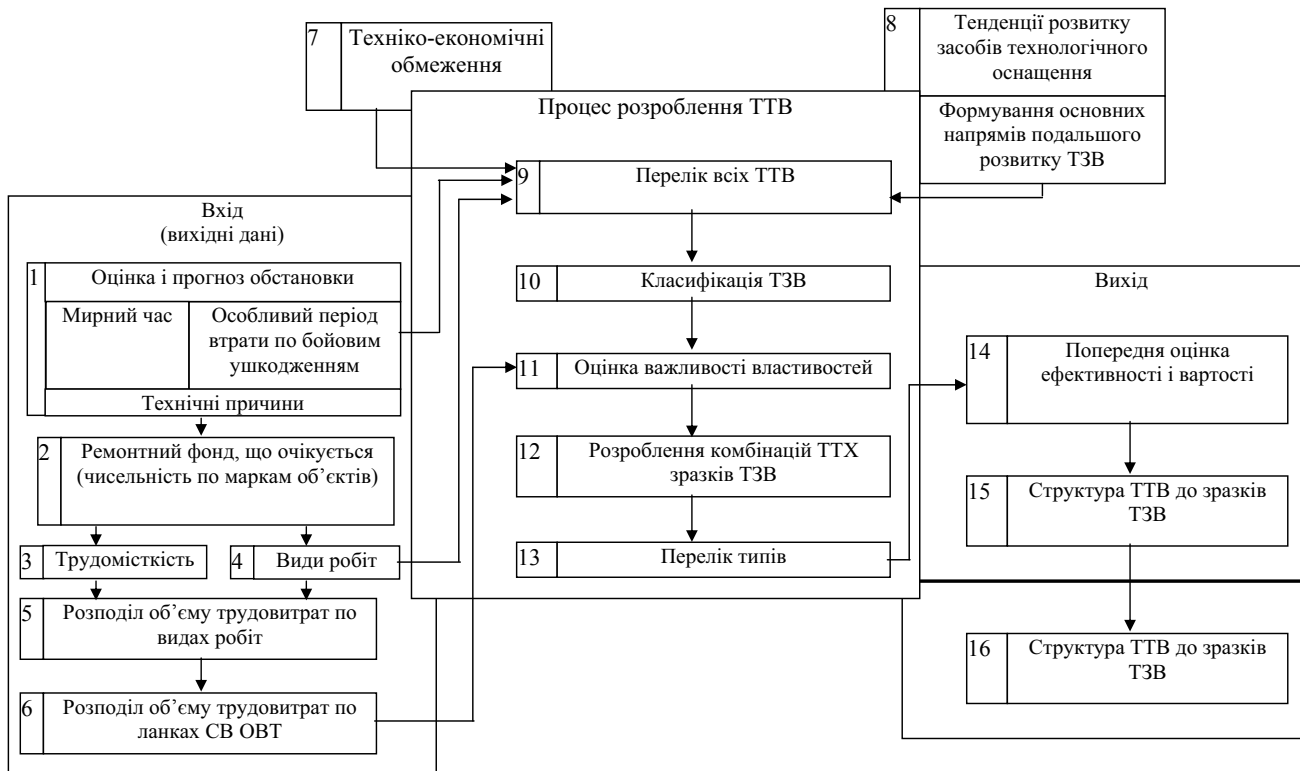


Рис. 1. Послідовність обґрунтування тактико-технічних вимог до технічних засобів відновлення

ситуацій їх застосування зумовлюють необхідність впорядкування процесу розроблення ТТВ. Таке впорядкування можна зробити, якщо використовувати модель функціонування системи, укомплектованої засобами з характеристиками, що розробляються; виявити повний набір кількісних і якісних показників, що визначаються тактико-технічними характеристиками до перспективних ТЗВ; комбінуючи різні технічні і тактичні характеристики, виявити їх якнайкраще поєднання так, щоб вони відповідали прийнятій моделі і, у той же час, їх можна було б здійснити сучасними технічними і виробничими засобами.

Відповідно до прийнятої моделі функціонування системи відновлення зручно вибрати аналогічну їй послідовність розроблення ТТВ (рис. 1). Вхід моделі 1–6 є групою вихідних даних, отриманих на підставі прогнозування обстановки і потоку ремонтного фонду (РФ). Без цих даних неможливо обґрунтовано формулювати ТТВ, і тому вони повинні бути розроблені в першу чергу. Як обмеження виступають параметри 7 і 8, що також є вихідними даними для розроблення ТТВ. Обмеження можуть мінятися в ході розроблення ТТВ з урахуванням результатів науково-дослідних робіт, досягнень суміжних галузей, обґрунтування витратних сум, зняття з озброєння морально застарілих зразків техніки і т. д.

Власне процес розроблення ТТВ (9–13) полягає у визначенні всіх показників і характеристик діючих технічних засобів за умови заданих обмежень і з урахуванням результатів прогнозування майбутньої обстановки функціонування системи.

Виходом усієї моделі є оцінка ефективності дій системи, укомплектованої ТЗВ, що має нові розроблені характеристики. Якщо ефективність виявиться вище існуючої, то завершальним етапом роботи стає оформлення у вигляді структури ТТВ завдання на створення. Якщо ж прийняті ТТХ не приводять до істотного підвищення ефективності, то моделювання необхідно повторити спочатку з іншими властивостями.

Якість і ефективність організації всіх робіт, а також успішне рішення раптово виникаючих задач з ремонту в польових умовах залежать від об'єму, достовірності, своєчасності надходження і узагальнення інформації. Тому при розробленні перспективних ТЗВ крім впровадження передового технологічного устаткування і оснащення слід звертати увагу на забезпечення ремонтних органів сучасною оргтехнікою, тобто комплексом технічних засобів, що використовуються для автоматизації управлінської і інженерно-технічної праці.

Вхідний потік РФ характеризується кількісними і якісними показниками. До кількісних показників відносяться: щільність та інтенсивність потоку РФ, трудомісткість робіт, розподіл по ланках СВ ОВТ, розподіл трудомісткості за видами робіт і типами ОВТ, що підлягають ремонту. Перелік усіх робіт за видами, що характерні для процесу відновлення ОВТ, дозволяє сформулювати основне призначення технологічного устаткування і оснащення. З досвіду [4, 5] відомо, що в характерних ситуаціях у тому або іншому ступені виникає необхідність проведення таких видів робіт:

евакуація, буксирування, транспортування пошкодженої, застряглої, затонулої техніки;

вантажопідйомні роботи (до 5 т і більше);  
 демонтажно-монтажні, слюсарно-налагоджувальні, регулювальні, центрувальні;  
 обслуговування відремонтованого ОБТ;  
 слюсарно-механічні роботи (токальні, фрезерні, шліфувальні, свердлильні та ін.);  
 заряджання акумуляторних батарей, їх обслуговування і ремонт;

діагностика, ремонт і регулювання електроспецобладнання і навігаційної апаратури;

ремонт озброєння, оптики й інфрачервоної техніки.

До всіх цих робіт слід додати ремонт деталей і складальних одиниць різними способами. Але виконання таких робіт здійснюється, як правило, на стаціонарних ремонтних підприємствах або в рухомих ремонтних засобах центру. Завдяки знеособленому методу ремонту ОБТ у ремонтних ланках тактичного рівня витрати праці на відновлення деталей і складальних одиниць практично близькі до нуля.

Кількісна оцінка кожного з перелічених видів робіт проводиться за статистичними довідковими даними (табл. 1), що отримані на практиці у військах. Так, наприклад, об'єм демонтажно-монтажних робіт у ланках тактичного рівня складає в середньому 74,5% усієї трудомісткості робіт, що виконуються в ремонтних органах цього рівня. Причому роботи з метою доступу до несправних і пошкоджених складальних одиниць машини становлять 31%, центрування – 20%, підгонка по місцю – 11%, регулювання приводів керування – 12%.

Таблиця 1. Кількісна оцінка процентного складу ремонтних робіт від сумарної їх трудомісткості

Види ремонтних робіт	Процентний склад робіт від сумарної трудомісткості		
	до 100 люд./год	100...300 люд./год	300...500 люд./год
Демонтажно-монтажні	87...68	80...70	78...72
Теплові	8...13	7...11	6,5...8
Ремонт електрообладнання	4...7	5...7	5...6
Слюсарно-механічних	4...5	4,5...5	4,5...5
Ремонт озброєння і оптики	1...3	2...4	4...6
Інші види робіт	2...4	1,5...4	1...3

Подібні статистичні стійкі співвідношення дозволяють обґрунтовано формулювати вимоги до виробничих можливостей перспективних ТЗВ як основного показника РРМ і інших засобів оснащення виробничого процесу відновлення.

В оцінку обстановки очікуваних дій ремонтних підрозділів і частин включають, крім того, ряд тактичних особливостей і нормативів. До них відносяться темпи пересування військ, глибина задач, що вирішуються, ширина смуги дій військ. Враховуються також кліматичні і географічні особливості театру воєнних дій, в умовах якого буде потрібно організовувати виробничий процес відновлення ОБТ. На підставі оцінки цих показників приймається рішення про формулювання вимог до рухливості, прохідності й запасу ходу РЗТОіР.

Прогноз вірогідних способів ведення бойових дій із застосуванням супротивником різних засобів ураження дозволяє формулювати вимоги до такого показника, як ступінь захищеності особового складу і матеріальної частини від звичайної зброї і від засобів масового ураження. Актуальними є питання ергономіки (життєпридатності) виробничих приміщень РРМ при тривалому перебуванні в них особового складу з ізоляцією від зовнішнього середовища. Далеко не всі задачі цього напрямку в даний час вирішені повністю.

Нарешті, як в мирний час, так і в особливий період досягнутий рівень показників надійності ТЗВ є найважливішою характеристикою їх якості. Для мирного застосування важливо досягти високих показників їх довговічності і збереженості. Наприклад, термін служби кузовів РРМ повинен складати не менше 10 років.

В особливий період велике значення мають високі показники безвідмовності, ремонтпридатності і обслуговуваності, від яких багато в чому залежить ефективність ТЗВ.

Отже, при розробленні ТТВ до перспективних ТЗВ виконується оцінка обстановки функціонування ремонтних ланок шляхом прогнозування всього комплексу умов майбутніх дій. У результаті прогнозування можна орієнтовно визначити об'єм та зміст основних і допоміжних робіт, які виконуються за допомогою ТЗВ, що дозволяє наперед виявити основні ТТХ устаткування і оснащення, які проєктуються.

При визначенні ТТВ необхідно враховувати ряд обмежень на проєктування, розроблення і серійне виробництво перспективних (що модернізуються) ТЗВ. До числа основних обмежень розвитку комплексу ТЗВ, перш за все, слід віднести асигнування коштів. Створення економічних ТЗВ з низькою собівартістю їх виробництва є один з напрямів підвищення ефективності СВ ОБТ. При розробленні ТТВ важливо втримати ліміти коштів і добитися їх раціонального використання. Для цього вимагається визначити загальну лінію вдосконалення перспективних ТЗВ відповідно до тенденцій їх розвитку протягом достатньо тривалого періоду.

Деякі характерні тенденції в зміні типажу ТЗВ дають змогу сказати, що загальне число найпоширеніших типів РРМ з ремонту БТОТ, АТ та РАО з 1949 року до теперішнього часу змінилися неістотно. Очевидно, в найближчій перспективі доцільно витримувати загальний напрям на обмеження типажів РРМ. Проте при загальній стабільності типажів ТЗВ спостерігається істотна зміна номенклатури майстерень з їхньої спеціалізації за післявоєнний час. Відбувається перерозподіл функцій між різними типами майстерень. Наприклад, серед РРМ для виконання демонтажно-монтажних, слюсарно-налагоджувальних, регулювальних, вантажопідйомних (до 1,5 т) робіт і обслуговування техніки існували тричотири марки майстерень. У даний час їх більше десяти. З введенням броньованих машин (БРЕМ) відбувся деякий перерозподіл функцій: до зазначених робіт додалися такі, як евакуація техніки, зварювальні роботи, технічна розвідка та ін.

Особливості ведення бойових дій відповідно до сучасних поглядів, насиченість військ різноманітною технікою викликали необхідність розширення типуажу даних ТЗВ. За останні часи спостерігається тенденція до спеціалізації ТЗВ по марках об'єктів, що підлягають ремонту (наприклад, ТРМ-А-172). Очевидно, що така тенденція може зберегтися.

Для рухомих ремонтних майстерень, що можуть бути повністю уніфіковані (слюсарно-механічні; зварювальні і ковальсько-мідницькі, зварювальні агрегати на причепах; ремонтно-зарядні станції акумуляторних батарей та ін.), характерні інші тенденції. Спостерігається поступове скорочення номенклатури майстерень цих типів, що виправдано технічно і економічно: достатньо мати по одному виду майстерень такого типу для відновлення всіх видів техніки.

Рухомі засоби ремонту електроспецобладнання, озброєння і оптики в найближчому майбутньому будуть потребувати істотного удосконалення. Потрібно враховувати інтенсивний розвиток комплексів управління вогнем, вдосконалення систем захисту, застосування ракетних комплексів і перспективу застосування обчислювальної техніки, наприклад балістичних обчислювачів. Крім того, рішення питань щодо автоматизованого управління військами спричинить за собою оснащення техніки, особливо командирських машин, електронними засобами збору, обробки і передачі інформації. Засоби ведення радіоелектронної боротьби також набули широкого розповсюдження. Значущість ремонту, обслуговування, регулювань подібної апаратури істотно зросла. Відповідно виникає необхідність у створенні спеціалізованих РРМ для підтримки систем у працездатному стані. Це означає, що номенклатура відповідних РРМ розширятиметься.

Враховуючи такого роду тенденції розвитку комплексу рухомих ТЗВ, можна визначити основний напрям

їх вдосконалення і вибрати номенклатуру перспективних ТЗВ. При цьому створення мінімально допустимої номенклатури комплексів дозволить збільшити розміри партій серійних зразків устаткування і тим самим знизити їхню собівартість у виробництві. Експлуатаційні витрати з розрахунку на одиницю устаткування також будуть знижені, якщо різномарочність його буде обмеженою.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Бронетанковая техника мира : справ. М. : АРМС ТАСС, 2006. 368 с.
2. Організація технічного забезпечення в арміях основних країн НАТО : навч. посібник. К. : ВТІУ, 1992. 197 с.
3. Експлуатація озброєння та військової техніки. Організація експлуатації та технічного обслуговування ракетних комплексів : навч. посібник. Львів : АСВ, 2010. 439 с.
4. Заикин А. А. Перспективы оснащения автомобильной техникой и подвижными средствами технического обслуживания и ремонта Вооруженных Сил Республики Беларусь // Наука – образованию, производству, экономике. Минск : БИТУ, 2007. С. 50–54.
5. Старцев В. В., Рогозін І. В., Литовченко Д. М. Перспективи створення сучасної рухомої автомобільної ремонтної майстерні вітчизняного виробництва // Системи озброєння і військова техніка : наук. журн. / ХУПС, 2016. № 2 (46). С. 150–154.

**Рецензент С. В. Лапицький**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)

УДК 621.396.6

**Д. Б. КУЧЕР,***доктор технічних наук, професор,***Н. Б. СМІРИНСЬКА,***старший науковий співробітник**(Інститут Військово-Морських Сил**Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса)*

## Особливості конструкції пристрою формування послідовності потужних електромагнітних випромінювань у системах обмеженого об'єму

*Розглянуто принципи побудови, конструкція та часові етапи спрацьовування елементів пристрою формування послідовності імпульсних впливів з урахуванням його розміщення в системах обмеженого об'єму.*

**Ключові слова:** потужні електромагнітні випромінювання, вибухомагнітний генератор, електровибухоючий провідник, вторинний пробій продуктів детонації, механізм швидкого електричного вибуху провідників, комутатор, пристрій формування послідовності імпульсних впливів.

*Рассмотрены принципы построения, конструкция и временные этапы срабатывания элементов устройства формирования последовательности импульсных воздействий с учетом его размещения в системах ограниченного объема.*

**Ключевые слова:** мощные электромагнитные излучения, взрывомагнитный генератор, электровзрывающийся проводник, вторичный пробой продуктов детонации, механизм быстрого электрического взрыва проводников, коммутатор, устройство формирования последовательности импульсных воздействий.

Для фізичного знищення військової та цивільної інформаційної інфраструктури може застосовуватися електромагнітна зброя. В основі застосування такої зброї лежить використання енергії потужних електромагнітних випромінювань (ПЕМВ) для функціонального ураження (виводу з ладу чи деградації) чутливих елементів радіоелектронних систем (РЕС) [1–4]. Фізичне знищення типових цілей такими ПЕМВ досягається виникненням незворотних електромагнітних ефектів у напівпровідникових приладах (НП) та інтегральних мікросхемах (ІМС) під впливом уражаючих факторів (напруженості електричного й магнітного полів, тривалості імпульсу) [1–4].

Одиничне імпульсне випромінювання, що формується вибухомагнітними генераторами (ВМГ), лежить в мікросекундному діапазоні, тому для зменшення тривалості ПЕМВ у пристрій вводиться електровибухоючий провідник (ЕВП), що дає можливість сформувати надширокопasmовий вплив на РЕС. У цьому випадку випромінюється лише один імпульсний вплив наносекундної тривалості, при цьому радіус ураження напівпровідникових елементів РЕС не перевищує 50 метрів від точки випромінювання через значне ослаблення енергетичних характеристик ПЕМВ при поширенні в просторі [3, 5]. Збільшення уражаючої спроможності впливу ПЕМВ на РЕС противника можливе шляхом дії на об'єкт послідовністю імпульсних випромінювань з періодом слідування, меншим за час відновлення (релаксації) напівпровідникових елементів РЕС.

Поліімпульсний електромагнітний вплив може діяти на РЕС не лише через антенно-фідерні пристрої, але й через лінії зв'язку, земну поверхню, заземлення, органи управління, тріщини, шви, металеві трубопроводи та інші елементи конструкції цілей. При дії одиночного імпульсного впливу дані тракти проникнення зазвичай не розглядаються як загроза порушення роботи систем через високий рівень дисипації на них електромагнітної енергії [3]. Однак у разі поліімпульсного енергетичного впливу рівні напруженостей електромагнітних полів, що проникають через елементи конструкції РЕС, та амплітуди струмів і напруг, що наводяться в лініях зв'язку, живлення та заземлення, збільшуються, як мінімум, на порядок.

Для реалізації послідовної комутації провідників найпридатнішим є механізм швидкого електричного вибуху [6–9, 10], точніше вторинний пробій продуктів детонації, що може виникати на етапі перетворення металів в дрібнодисперсну масу. Аналіз результатів експериментальних досліджень, проведених в роботах [6–9], показав, що даний механізм можливий при густині струму  $j \geq 10^7$  А/см<sup>2</sup> для ЕВП радіусом  $a_0 \leq 0,1$  мм.

Формування послідовності потужних імпульсних випромінювань здійснюється шляхом електричного вибуху кількох провідників, кожен з яких підключається до генератора спеціалізованими комутаторами, принцип дії яких заснований на явищі вторинного пробію продуктів детонації легкоплавких ЕВП. Момент часу спрацьовування кожного ключа визначається тривалістю першого та другого етапів електричного вибуху



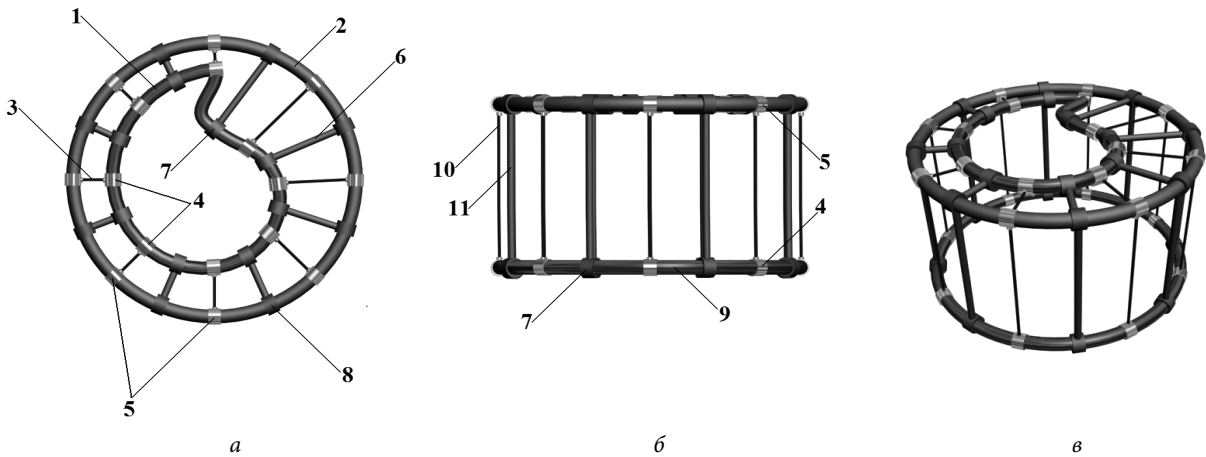


Рис. 1. Пристрій формування імпульсної послідовності електромагнітних впливів у системах обмеженого об'єму (а – вигляд зверху; б – вигляд збоку; в – загальний вигляд пристрою)

попереднього ЕВП та експериментально визначеним періодом повторення впливів [11].

Як генератор, що формує необхідну для швидкого електричного вибуху густину струму, можливо використовувати спіральний ВМГ, що детально розглянутий у роботах [12, 13].

Однак в сучасній літературі практично не висвітлені питання, що пов'язують тривалості етапів нагріву, плавлення та перетворення в дрібнодисперсну масу з утворенням паузи струму від теплофізичних та конструкційних характеристик ЕВП.

У [14] були отримані експериментальні залежності тривалості існування паузи струму від теплофізичних та конструкційних параметрів легкоплавких провідників, але пристрій формування послідовності імпульсних впливів (ПФПВ), який розглянуто в даній роботі, розроблявся для проведення натурного експерименту та не відповідає вимогам до масових і габаритних показників, що необхідні для розміщення його в системах обмеженого об'єму.

Тому далі пропонується розглянути фізичні принципи побудови ПФПВ з урахуванням його розміщення всередині корпусу, що має обмежений об'єм.

Грунтуючись на основних фізичних процесах, що відбуваються як під час введення великих густин струму в тугоплавкі ЕВП [6–8, 11], так і під час вторинного пробою продуктів детонації легкоплавких провідників [6–8, 15], а також, виходячи з необхідності розміщення багатоеlementної структури в конструкції обмеженого об'єму, пропонується такий варіант виконання ПФПВ (рис. 1). До складу такого пристрою входить верхня струмоведуча шина 1, що кріпиться до опорного діелектричного каркаса 2 горизонтальними розподільчими елементами 6 через однороз'ємні 7 та двороз'ємні хомути 8. Між верхньою струмоведучою шиною та опорним каркасом в однороз'ємних 4 та двороз'ємних електродах 5 розміщуються легкоплавкі ЕВП 3 однакової площі перерізу та різної довжини.

Зі зворотного боку пристрою розміщується нижня струмоведуча шина 9, що кріпиться до опорного

діелектричного каркаса вертикальними розподільчими елементами 11, також через однороз'ємні 7 та двороз'ємні хомути 8. Між опорним діелектричним каркасом та нижньою струмоведучою шиною в однороз'ємних 4 та двороз'ємних 5 електродах розміщуються тугоплавкі ЕВП 10 однакової довжини. Форма верхньої струмоведучої шини дозволяє, у деяких межах, варіювати відстань між електродами 4 та 5, а отже, і довжину легкоплавких ЕВП 3, вторинний пробій продуктів детонації яких лежить в основі послідовної комутації тугоплавких провідників 10. Горизонтальні та вертикальні розподільчі елементи, а також хомути для їх кріплення на опорний каркас, виконані з діелектричного матеріалу. Струмопровідні шини 1 та 9 здійснюють безпосередній контакт між ВМГ та електровибухаючими провідниками 1 і 10.

Принцип дії ПФПВ, перед усім, пов'язаний з фізичними процесами, що виникають у легкоплавких провідниках (швидкий електричний вибух, пауза струму та вторинний пробій продуктів детонації). При спрацюванні ВМГ на зовнішню струмоведучу шину надходить струм  $i_1(t)$ , викликаючи перетворення легкоплавких провідників у дрібнодисперсну масу (матеріал ЕВП набуває властивостей газу з високою густиною та тиском). Такий швидкий електричний вибух легкоплавких провідників 3 призводить до розриву кола, й сигнал з генератора не надходить на навантаження (див. рис. 1).

Оскільки в запропонованому пристрої всі легкоплавкі ЕВП мають однакову площу перерізу, а їх довжини відрізняються несуттєво, електричний вибух усіх провідників 3 відбудеться майже одночасно [11]. Тривалість електричного вибуху легкоплавких ЕВП, у залежності від обраного радіуса (від  $0,06 \cdot 10^{-3}$  до  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м), буде лежати в інтервалі від  $\approx 2,6 \cdot 10^{-9}$  с до  $\approx 18,5 \cdot 10^{-9}$  с. Розрив кола (пауза струму) буде зберігатися, поки густина та тиск продуктів детонації, що утворилися в ході електричного вибуху кожного із свинцевих провідників, знизяться до критичного значення. Зниження густини й тиску пов'язане зі швидкістю розширення продуктів детонації, що підпорядкована параболічному закону, як

в моделі сильного вибуху [14]. При розширенні газоподібних продуктів детонації зменшується їх тиск та густина, а середня довжина пробігу зростає. Коли середня довжина пробігу досягне критичного значення, виникне електрична дуга між електродами 4 і 5, що характеризує вторинний пробій (замикання кола).

Оскільки легкоплавкі ЕВП мають різну довжину, первинні значення тиску та густини продуктів детонації також будуть різними [11]. А отже, тривалість паузи струму для кожного легкоплавкого ЕВП також буде відрізнятися. Мінімальне значення паузи струму буде після електричного вибуху найменшого легкоплавкого провідника [14, 15]. При цьому повинна виконуватися умова  $l > 5 \cdot 10^{-3}$  м (де  $l$  – довжина ЕВП), дотримання якої означає, що розрядний проміжок повністю зберігає свої ізолюючі властивості до зниження тиску та густини продуктів детонації до критичних значень. Таким чином, час спрацьовування першого комутатора  $t_{cp1}$  (вторинний пробій продуктів детонації ЕВП) буде визначатися лише паузою струму, що виникає після електричного вибуху найменшого легкоплавкого провідника (рис. 2).

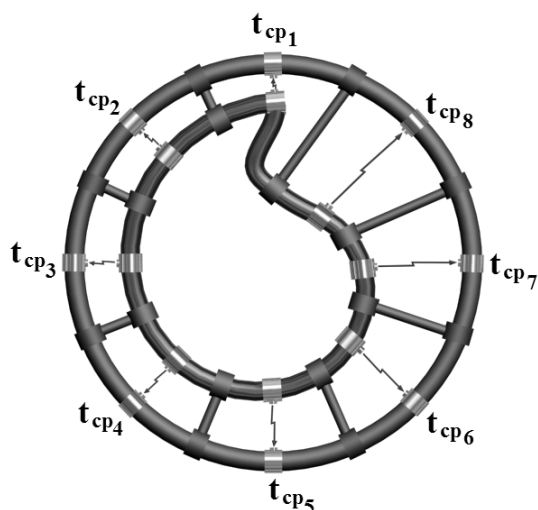


Рис. 2. Порядок спрацьовування комутаторів в пристрої формування послідовності імпульсних впливів

Обираючи як джерело живлення спіральний ВМГ [12, 13], запишемо вираз, що характеризує час спрацьовування першого комутатора в запропонованому пристрої

$$t_{cp1} = \frac{5\rho_0^2 l}{24P_{пл\,кр}} \frac{3d^2 I_2}{2D[\mu_0 \pi(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)K(r_{cp}/l^*)]} \sqrt{\frac{R_{ЕВП}^3}{40\pi^3 \rho_{ЕВП}^3 (W_L^*)^3}} \times \sqrt{\left[\frac{1}{(t^*)^5} \left(\ln\left(\frac{mDt^*}{Ml^*}\right) - 0,6\right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left(\ln\left(\frac{mDt^{**}}{Ml^*}\right) - 0,6\right)^2\right]} \quad (1)$$

де  $\rho_{ЕВП}$  та  $\rho_0$  – густина ЕВП та оточуючого його газу;  $\mu_0$  – магнітна константа;  $P_{пл\,кр}$  – критичний тиск іонізованих продуктів детонації;  $r_1$  та  $r_2$  – радіуси витків соленоїда ВМГ на початку та в кінці спіралі відповідно;  $K(r_{cp}/l^*)$  – поправочний множник;  $W_L^*$  – питома енергія сублімації (утворення золю);  $R_{ЕВП}$ ,  $l$ ,  $l^*$  – питомий опір та довжина ЕВП відповідно;  $t^*$ ,  $t^{**}$  – тривалість

першого та другого етапів для ЕВП;  $m$  та  $M$  – маса вибухової речовини та лайнера ВМГ відповідно;  $d$  – діаметр дроту соленоїда ВМГ;  $I_2$  – постійний струм, що протікає в контурі генератора до підризу вибухової речовини;  $D$  – швидкість детонації вибухової речовини;  $l^*$  – довжина зовнішньої спіралі кінцевого соленоїда в складі ВМГ.

Приймаючи  $t_{cp1}$ , як період повторення імпульсних впливів, при якому виконується умова  $\frac{\tau_\phi}{t_{cp1}} \geq 5 \cdot 10^{-7}$ , що забезпечує функціональне ураження сучасних елементів РЕС, для часу спрацьовування (паузи струму)  $N$ -го комутатора [5] можна записати

$$t_{cpN} = Nt_{cp1} + (N-1)\tau_i, \quad (2)$$

де  $\tau_\phi$  – тривалість фронту,  $\tau_i$  – тривалість імпульсу, що формується під час електричного вибуху провідника, або, враховуючи вираз (1),

$$t_{cpN} = \frac{N5\rho_0^2 l}{24P_{пл\,кр}} \frac{3d^2 I_2}{2D[\mu_0 \pi(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)K(r_{cp}/l^*)]} \sqrt{\frac{R_{ЕВП}^3}{40\pi^3 \rho_{ЕВП}^3 (W_L^*)^3}} \times \sqrt{\left[\frac{1}{(t^*)^5} \left(\ln\left(\frac{mDt^*}{Ml^*}\right) - 0,6\right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left(\ln\left(\frac{mDt^{**}}{Ml^*}\right) - 0,6\right)^2\right]} + (N-1)\tau_i \quad (3)$$

При роботі ПФПВ кожен з комутаторів під час пробою підключає в коло генератора через дворов'ємний електрод 5 тугоплавкий провідник 10 (див. рис. 1). Матеріал та конструктивні параметри кожного ЕВП 10 визначають тривалість кожного імпульсу в послідовності, що формується. Оскільки в обраній структурі всі тугоплавкі провідники 10 виконані з одного матеріалу й мають однакову довжину та площу перерізу, то всі сформовані імпульси в послідовності будуть мати однакову тривалість  $\tau_i$ .

Величина  $\tau_i$  формується двома етапами електричного вибуху. На першому етапі, що характеризує тривалість фронту  $\tau_\phi$ , провідник нагрівається до температури плавлення. На другому етапі, що характеризує тривалість спаду  $\tau_c$ , провідник розширюється та перетворюється в дрібнодисперсну масу. При підключенні ЕВП до спірального ВМГ тривалість спаду можна записати таким чином [5]:

$$\tau_c \approx \sqrt[3]{\frac{m^2 D^2 A_2 I^3 (\tau_\phi)^5}{M^2 l^{*2} \left[ A_2 I^3 \left( \ln\left(\frac{mD\tau_\phi}{Ml^*}\right) - 0,6 \right)^2 - 20W^{**} D^2 (\tau_\phi)^5 \right]}}, \quad (4)$$

де  $A_2 = \frac{9d^4 I_2^2 R_{ЕВП}^3 \rho_0^3}{8\pi^3 \rho_{ЕВП}^3 (W_L^*)^3 [\mu_0 \pi(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)K(r_{cp}/l^*)]^2}$ ;  $W^{**}$  – питома енергія електричного вибуху.

Для умови  $\tau_\phi \gg \tau_c$  функціональне ураження РЕС послідовністю імпульсів можливе при  $\frac{\tau_\phi}{T_{повт}} \geq 5 \cdot 10^{-7}$ , де  $T_{повт}$  – експериментально визначений період повторення впливів. Приймаючи, що період повторення імпульсних

впливів повинен бути рівним паузі струму в першому комутаторі (див. вираз (1)), умова функціонального ураження для вибраної структури буде визначатися часом спрацювання першого комутатора  $\frac{\tau_\phi}{t_{cp1}} \geq 5 \cdot 10^{-7}$ . Залежність для  $\tau_\phi$  можна отримати з урахуванням виразу (5):

$$\tau_\phi = \sqrt[3]{\frac{A_2 l^3 m^2}{20 W^{**} M^2 (l^*)^2}}. \quad (6)$$

Моменти спрацювання наступних комутаторів будуть визначатися величинами  $\tau_i$  та  $t_{cp_i}$ . Фізична реалізація необхідного моменту спрацювання  $N$ -го комутатора можлива шляхом збільшення паузи струму.

Однак чим вища температура плавлення тугоплавких провідників, тим більшою буде тривалість їх електричного вибуху та тим більшими повинні бути довжини легкоплавких (комутуючих) провідників. Для проведення експериментальних досліджень більші розміри комутуючих легкоплавких провідників прийнятні [14]. Проте у випадку розміщення пристроїв формування імпульсних послідовностей у конструкціях обмеженого об'єму довжини легкоплавких ЕВП можуть набувати критичних значень.

Для визначення залежності первинної довжини легкоплавких ЕВП з необхідними моментами спрацювання комутаторів перепишемо вираз (3) таким чином:

$$t_{cpN} = \frac{N 5 \rho_0^2 l}{24 P_{пл\,cp}} \frac{3 d^2 I_2}{2 D [\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{cp}/l^*)]} \sqrt{\frac{R_{ЕВП}^3}{40 \pi^3 \rho_{ЕВП}^3 (W_L^*)^2}} \times \\ \times \sqrt{\left[ \frac{1}{(l^*)^5} \left( \ln \left( \frac{m D l^*}{M l^*} \right) - 0.6 \right)^2 - \frac{1}{(l^*)^5} \left( \ln \left( \frac{m D l^{**}}{M l^*} \right) - 0.6 \right)^2 \right]} + \\ + (N-1) \left[ \sqrt[3]{\frac{A_2 l^3 m^2}{20 W^{**} M^2 (l^*)^2}} + \sqrt{\frac{m^2 D^2 A_2 l^3 (\tau_\phi)^5}{M^2 l^{*2} \left[ A_2 l^3 \left( \ln \left( \frac{m D \tau_\phi}{M l^*} \right) - 0.6 \right)^2 - 20 W^{**} D^2 (\tau_\phi)^5 \right]}} \right]. \quad (7)$$

Грунтуючись на виразі (7), побудовано графічну залежність (рис. 3), що пов'язує час спрацювання комутаторів (тривалість існування паузи струму) з довжиною легкоплавких ЕВП. Залежність, показана на рис. 3, побудована для восьми свинцевих ЕВП однакового радіуса ( $0,06 \cdot 10^{-3}$  м) та різної довжини. Як навантаження кожного комутатора було використано вольфрамові провідники (див. рис. 1). Базуючись на виразі (7) та графічній залежності, в табл. 1 зведені значення конструктивних параметрів легкоплавких ЕВП, що входять до складу пристрою, та відповідні їм тривалості паузи струму (час спрацювання комутаторів).

При моделюванні враховувалось, що кожен з восьми комутаторів навантажений на вольфрамовий провідник з однаковими конструктивними параметрами (див. табл. 1). У цьому випадку при послідовній комутації відповідного вольфрамового провідника тривалість електричного вибуху кожного елемента буде однаковою.

Вибір варіанта виконання ПФПВ та конструктивних і часових характеристик роботи ЕВП (див. рис. 3 та табл. 1) дозволили побудувати часову залежність струму, що передається від генератора на навантаження (рис. 4, а). Часова залежність струму, що формується в системах обмеженого об'єму без пристрою формування імпульсної послідовності, зображена на рис. 4, б.

Аналізуючи залежності, що показані на рис. 4, необхідно відзначити, що наявність пристрою формування імпульсної послідовності в системах обмеженого об'єму дозволяє збільшити час корисної роботи ВМГ (на рис. 4 часова залежність струму, що передається ВМГ на навантаження, показана пунктирною лінією). ПФПВ дозволить сформувати та передати на навантаження вісім імпульсних впливів. Кожен із сформованих імпульсів у послідовності за своєю енергією порівняний з одиночним впливом.

Для сформованої імпульсної послідовності виконується умова  $\frac{\tau_\phi}{t_{cp1}} \geq 5 \cdot 10^{-7}$ , за якої на чутливих

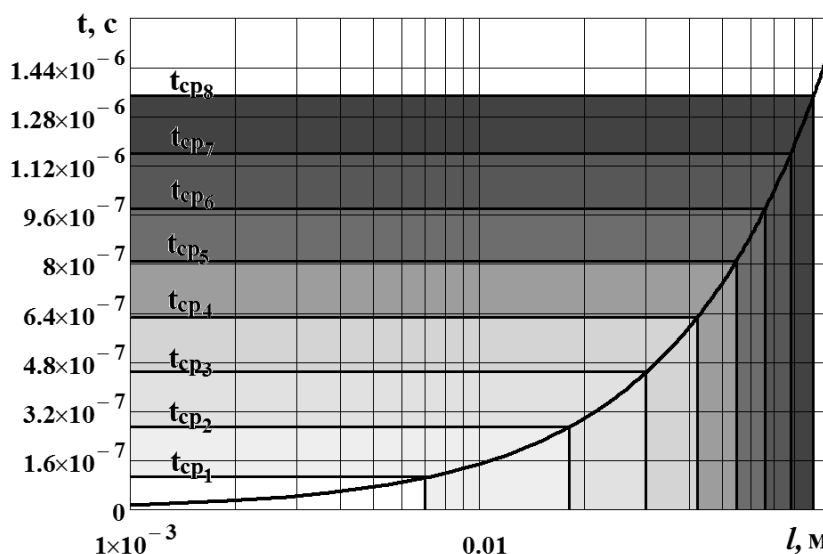


Рис. 3. Залежність часу спрацювання комутаторів, що побудовані на принципі вторинного пробою продуктів детонації, від довжини легкоплавких ЕВП

Таблиця 1. Співвідношення довжин та часу спрацювання комутуючих свинцевих провідників, навантажених на вольфрамові ЕВП

Довжина свинцевого ЕВП, м	Час спрацювання комутатора, с	Довжина / радіус вольфрамового ЕВП, м	Тривалість електричного вибуху вольфрамового ЕВП, с
0,007	$90 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,018	$270 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,03	$450 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,042	$630 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,055	$810 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,067	$980 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,078	$1160 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$
0,09	$1350 \cdot 10^{-9}$	$0,05 / 0,04 \cdot 10^{-3}$	$90 \cdot 10^{-9}$

елементах РЕС відбувається накопичення тепла від імпульсу до імпульсу без урахування теплової релаксації.

Довжина вольфрамового провідника (0,05 м) вибиралась з умови нездійсненності вторинного пробоя продуктів детонації тугоплавких ЕВП протягом всього часу роботи пристрою формування імпульсної послідовності. Для вибраної довжини вольфрамового провідника (див. табл. 1) тривалість паузи струму за рахунок

незначного розширення продуктів детонації складає не менше  $1720 \cdot 10^{-9}$  с.

Порівняння даного значення паузи струму з часом спрацювання останнього комутатора ( $1350 \cdot 10^{-9}$ с) дозволяє зробити висновок щодо виключення можливості вторинного пробоя продуктів детонації тугоплавкого ЕВП протягом всього часу роботи пристрою формування імпульсної послідовності.

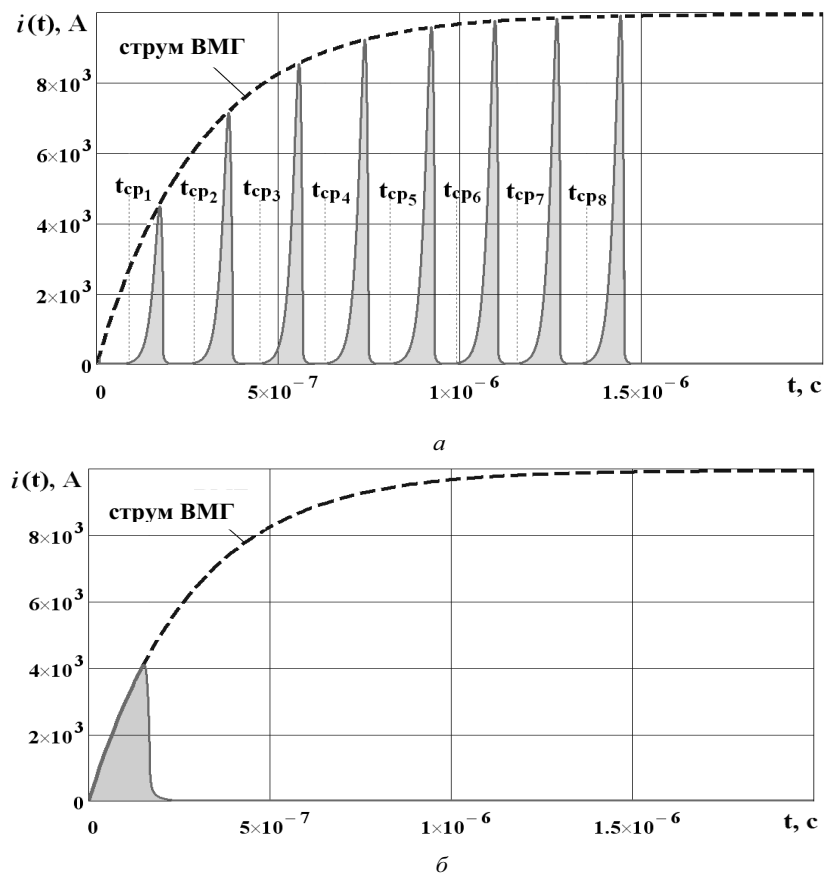


Рис. 4. Часова залежність струму, що передається від ВМГ на навантаження:  
а – з урахуванням ввімкнення ПФПВ; б – без ПФПВ (ВМГ навантажений на один вольфрамовий провідник)

Однак, аналізуючи конструктивні характеристики ЕВП, призначені для формування імпульсної послідовності (див. табл. 1), можемо зробити висновок, що розміщення такого пристрою можливе лише в системах обмеженого об'єму з діаметром 130 мм та більше.

**Висновки.** У роботі наведено варіант виконання ПФПВ та рекомендації щодо вибору теплофізичних та конструктивних параметрів ЕВП, що входять до його складу, які враховують можливість розміщення пристрою формування послідовності імпульсних впливів в системах обмеженого об'єму (діаметром 130 мм та вище). Вказані часові етапи спрацювання елементів пристрою формування послідовності імпульсних впливів, з урахуванням його розміщення в системах обмеженого об'єму.

Наявність ПФПВ в системах обмеженого об'єму дозволяє збільшити час корисної роботи ВМГ, сформувати кілька імпульсних впливів, кожен з яких за своєю енергією порівняний з одиночним ПЕМВ, що утворюється при роботі системи обмеженого об'єму без запропонованого пристрою.

При використанні в складі ПФПВ вольфрамових провідників розміщення пристрою можливе лише в корпусах діаметром 130 мм та більше. Це пояснюється тим, що при комутації останніх двох вольфрамових провідників для забезпечення відповідних пауз струму ( $t_{nm_7} = 1160 \cdot 10^{-9}$  та  $t_{nm_8} = 1350 \cdot 10^{-9}$ ) первинні довжини відповідних свинцевих провідників повинні бути 0,078 м та 0,9 м.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Кравченко В. И. Электромагнитное оружие. Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. 185 с.
2. Прищепенко А. Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 208 с.
3. Кравченко В. И. Оружие на нетрадиционных физических принципах : Электромагнитное оружие. Х. : НТМТ, 2009. 266 с.
4. Ковтуненко О. П., Богучарський В. В., Слюсар В. І., Федоров П. М. Зброя на нетрадиційних принципах дії (стан, тенденції, принципи дії та захист від неї) : моногр. Полтава : ПВІЗ, 2006. 247 с.
5. Кучер Д. Б., Харланов А. И., Макогон В. П., Зонтова Т. В. Экспериментальная оценка стойкости радиоприемных средств к воздействию мощного электромагнитного излучения // Системы управління, навігації та зв'язку. К. : ЦНДІ навігації і управління. 2011. Вип. 2 (18). С. 51–55.
6. Лебедев С. В., Савватимский А. И. Об исчезновении электропроводности металла вследствие сильного нагрева электрическим током большой плотности // Теплофиз. выс. темп. 1970. Т. 8, № 3. С. 524–531.
7. Лебедев С. В. Исчезновение проводимости металла при электрическом взрыве и развитие микроскопических неоднородностей вдоль взрывающейся проволоки // Теплофиз. выс. темп. 1981. Т. 19, № 2. С. 301–308.
8. Лебедев С. В., Савватимский А. И. Металлы в процессе быстрого нагрева электрическим током большой плотности // Успехи физических наук. 1984. Т. 144, Вып. 2. С. 215–250.
9. Иваненков Г. В., Пикуз С. А., Шелковенко Т. А. [и др.]. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проводочек. Ч. 1. Основные процессы электрического взрыва проводников в вакууме. М. : РФЯЦ ВНИИТФ им. Забабахина, 2004. 26 с.
10. Кучер Д. Б., Зонтова Т. В. Формирование наносекундных импульсов тока при использовании механизма быстрого электрического взрыва // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: 8-я Международная молодежная научно-техническая конференция РТ-2012. Севастополь : СНТУ, 2012. С. 390.
11. Кучер Д. Б., Литвиненко Л. В., Зонтова Т. В. Особенности формирования последовательности импульсных электромагнитных воздействий при реализации механизма электрического взрыва проводников // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : 4-й Международный форум : сб. науч. трудов. Т. 1, Ч. 2. Харьков : АНПРЭ, ХНУ-РЭ, 2011. С. 233–236.
12. Кучер Д. Б., Тараненко С. В., Литвиненко Л. В., Зонтова Т. В. Исследование максимальной скорости срабатывания спирального взрывомагнитного генератора при взрывном сжатии контура с током // Интегровані технології та енергозбереження : шоквартальний наук.-практ. журн. / НТУ «ХПИ». 2010. № 3. С. 88–92.
13. Кучер Д. Б., Голубцов Д. Л., Мардерос В. Н., Зонтова Т. В. Особенности применения спиральных взрывомагнитных систем в конструкциях ограниченного объема // Системы озброєння і військова техніка : шоквартальний наук.-практ. журн. / ХУПС ім. Івана Кожедуба. 2011. Вип. 2 (26). С. 65–68.
14. Кучер Д. Б., Литвиненко Л. В., Зонтова Т. В. Экспериментальные исследования паузы тока, возникающей после быстрого электрического взрыва легкоплавких проводников // Системы обробки інформації. Інформаційні проблеми акустичних, радіоелектронних та телекомунікаційних систем. Харків : ХУПС ім. Івана Кожедуба. 2012. Вип. 6 (104). С. 62–65.
15. Кучер Д. Б., Зонтова Т. В. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений // Системы обробки інформації / ХУПС ім. Івана Кожедуба. 2012. Вип. 3 (101). Т. 2. С. 73–77.

**Рецензент В. М. Кошовий**, д-р техн. наук, проф.  
(Національний університет «Одеська морська академія»)

## Результати засідання Робочої групи НАТО з навантаження солдата (Embarked Soldier Working Group, ESWG)

Зазначена робоча група є відносно новою експертною спільнотою, що з 1 березня 2016 року функціонує в складі Групи НАТО з розвитку спроможностей систем військовослужбовця у пішому порядку (LCG DSS) Групи з озброєнь сухопутних військ (AC/225, NAAG) Конференції національних директорів з озброєння (CNAD). Основним завданням робочої групи ESWG є вирішення проблем стандартизації навантаження персоналу, гармонізації вимог до обсягів екіпіровки солдат, сидінь та ременів безпеки.

Чергове засідання ESWG відбулося 3–4 квітня 2017 року поблизу м. Квантіко (штат Вірджинія, США). У роботі ESWG брали участь 10 експертів, що представляли Бельгію, Нідерланди, Сінгапур, Корпус морської піхоти США (USMC), Україну, а також Університет штату Мічиган та компанію HumanSystems Inc.

Згідно з порядком денним **керівник ESWG** доктор Брейн Корнер здійснив брифінг щодо цифрового 3D моделювання фігур солдатів, яке застосовується в USMC на підставі статистичних даних, отриманих під час антропометричних досліджень “USMC 2010 Anthropometric Survey” ([www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA581918](http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA581918)). При цьому були висвітлені підходи на основі аналізу головних компонентів (Principal Component Analysis, PCA), застосування форматів даних PLY та NURBS, нелінійної B-сплайнової апроксимації у CAD-системах. Вивчаються як чоловічі, так і жіночі 3D моделі для оцінки різних варіантів компоновки та навантаження дослідного зразка тактичної бронемашини JLTV (Joint Light Tactical Vehicle), інших наземних і повітряних транспортних засобів.

**Представник Нідерландів** презентував проект сидіння і механізму кріплення для бойових машин. Цікаво, що зазначене сидіння кріпиться не до стелі кабіни, а до бокової стінки. Це є менш ефективним варіантом, оскільки позбавляє додаткового часу на поглинання енергії вибуху порівняно з кріпленням сидіння до стелі. У той же час, запропонована удосконалена система ременів безпеки дозволяє забезпечити фіксацію тіла в плечах, у поясі та на рівні стегон. Доповідач вказав на потребу стандартизації інтервалу між верхівкою шолома та корпусом машини, який, на його думку, має бути не менше половини висоти шолома.

**Представник України** (автор цих інформаційних матеріалів) виступив з презентацією, в якій було представлено концепцію протимінного захисту сидінь бойових машин на основі металевих демпферів, що зминаються, розроблену представником ЦНДІ ОВТ ЗС України Л. Давидовським. Спираючись на результати досліджень Л. Давидовського, експертам було запропоновано уніфікувати конструкцію сидінь бойових машин та вертольотів шляхом використання однакових

за габаритами, але різних за стійкістю до зминання демпферів. При цьому слід врахувати, що пікове прискорення при жорсткій посадці вертольота в режимі авторотації (Autorotation, Autoflug) становить 14...30g тривалістю 70...180 мс, тоді як усередині автомобіля з протимінним захистом (MRAP) оцінюється на рівні 40...100g з терміном дії 10...30 мс.

**Представник компанії HumanSystems Inc.** ([www.humansys.com](http://www.humansys.com)) David Tack презентував розробку устаткування для тестування розміщення сидячих місць у транспортних засобах, що відпрацьовується в рамках проекту “Seated Test Accommodation Rig” (STAR). Він навів огляд літератури з тематики антропометричних досліджень солдатів у сидячому положенні. При цьому заслуговують на увагу публікації Центру ергономіки Мічиганського університету (<https://c4e.engin.umich.edu/research/publications/>), зокрема: Yaser Zerehsaza, Jionghua (Judy) Jina, Sheila M. Ebertb and Matthew P. Reed. Development of seating accommodation models for soldiers in vehicles // Ergonomics, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2016.1184760>.

Основною метою проекту STAR є розробка реконфігурованої системи моделювання місць водіїв для оптимізації параметрів сидінь при проектуванні. При цьому забезпечується оцінка ступеня придатності місць розташування морських піхотинців в існуючих конструкціях транспортних засобів залежно від антропометричних даних та екіпіровки, підтримка інтелектуальної адаптації тактичних транспортних засобів для інтеграції і розміщення морських піхотинців у всьому діапазоні форм їхнього тіла, визначення вимог до розмірів, необхідних для оптимізації дизайну сидінь.

Основою механічного симулятора місць водіїв є каркасна платформа, на якій за допомогою навісних модулів відтворюється інтер'єр робочого місця водія досліджуваного транспортного засобу. Система передбачає можливість регулювання положення сидіння по висоті на 292 мм та по горизонталі – на 272 мм. Доповідач звернув увагу на ключову роль стандарту MIL-STD-1472G для визначення меж регулювання сидінь, нахилів ніг та ін. При цьому мережа сенсорних датчиків фіксує всі налаштування, інформація про які заносяться в базу даних для кожного з учасників досліджень. Після збору статистики налаштувань формуються вимоги до оптимальних параметрів сидінь та необхідних меж їх зміни. Те ж стосується керма та педалей, при цьому записуються як параметри налаштувань, так і рівні механічних зусиль водія.

При обговоренні доповіді **представник України** висловив кілька конструктивних ідей щодо перспективних підходів до дизайну сидінь:

у подальших розробках сидінь для екіпажу та солдатів врахувати розміри екзоскелетів (ввести на додаток до типових рівнів спорядження ACU (advanced combat uniform), PPE (personal protective equipment), ENC (encumbered, ACU+PPE+hydration pack+tactical assault panel) їх модифікації з екзоскелетом);

розглядати екзоскелети як складовий елемент конструкції сидінь, використовуючи екзоскелети не тільки як частину механізму фіксації солдата на сидінні, а й для захисту від перевантажень під час підриву мін;

запровадити смарт-сидіння, що автоматично регулювали б свої габаритно-кутові параметри під антропометричні дані конкретного бійця, чиє ім'я внесене до бортової бази даних.

Підґрунтям для реалізації зазначених смарт-функцій самоналаштування крісел є використання під час антропометричних досліджень проекту STAR у складі експериментальних зразків сидінь мережі цифрових та механічних сенсорів з цифровим зчитуванням їхніх показів. Ідея полягає в тому, щоб в реальному масштабі часу всі дані про кути нахилу, відстані між сидіннями та їхні розміри автоматично заносилися в бортовий комп'ютер для кожного солдата з тим, щоб за збереженими в такий спосіб у бортовій базі даних параметрами в подальшому автоматично підлаштовувати параметри сидінь у випадку зміни членами екіпажу своїх функцій чи пересаджування на інші місця в бойових умовах, а також зміни бойових машин під час транспортування. У той же спосіб можливо буде автоматично адаптувати сидіння у вертольотах під час перевезень особового складу та при пересаджуванні з вертольотів у бойові машини, і навпаки. При цьому функції смарт-сидінь щодо автоматичної адаптації габаритно-кутових налаштувань слід розповсюдити і на педалі та кермо водія, регулюючи положення керма та нахил поверхні педалей за допомогою відповідних сенсорів.

Спираючись на той факт, що для водія вимоги до сидіння будуть іншими, ніж для командира та солдатів, оскільки водій повинен натискувати на педалі, *представник України* запропонував окремо стандартизувати вимоги до сидіння водія бойової машини, й окремо – для решти членів екіпажу. Ця пропозиція була підтримана керівником групи, який зазначив, що стандартизацію вимог сидінь солдатів буде зробити простіше, при цьому можливо стандартизувати вимоги до крісел залежно від функцій солдата у відділенні, наприклад, виділивши окремо вимоги до крісла командира.

*Представник Дослідного інституту транспортування Університету штату Мічиган (University of Michigan Transportation Research Institute)* Метью Рід (Matthew P. Reed, <http://mreed.umtri.umich.edu/mreed/>) надав інформацію про цифрове 3D моделювання людини у сидячому положенні з обстеженням військовослужбовців сухопутних військ США для оцінки місць розташування солдатів та прогнозування положення водіїв у процесі керування транспортним засобом. Приклади аналогічних моделей наведені на сайті <http://humanshape.org>.

Доповідач також продемонстрував, як в пакеті “Mathematica” формується 3D-модель сидячої фігури на основі даних лазерного сканування 315 військовослужбовців у сидячому положенні. Програмний продукт “Mathematica” обрано для побудови моделей, оскільки використовувати Solidworks для подібних завдань виявилось складно. Крім того, отримана модель легко тиражується для формування сукупної моделі всього відділення солдат у кріслах, для розгляду різного рівня їх екіпіровки (у тексті програми ставиться або видаляється лише символ коментаря перед описом необхідної частини оснащення). Зазначені моделі застосовуються також для виготовлення манекенів з метою проведення креш-тестів транспортних засобів.

Заслуговує на увагу категорія моделей, що описують статистичні границі тіла людини (верхівки шолома, грудної клітини, колін, так званий еліпс очей). Ці моделі дозволяють визначити безпечні дистанції від крісла до органів управління, корпусів машини тощо.

При обговоренні доповіді *представник України* запропонував реалізувати можливість *трансформації 3D моделі стоячої людини (аватара) у модель у сидячому положенні*, що полегшило би процес збору статистики, а також *поєднати геометричні 3D моделі солдат з моделлю розподілу тиску на різні ділянки тіла та з фізіологічною моделлю кровообігу*, яка б формувалась за допомогою ультразвукових сканерів. Потреба в таких комбінованих моделях обумовлена необхідністю заміни суб'єктивної оцінки ергономічних властивостей сидінь та механізмів фіксації тіла об'єктивною системою показників кровообігу. Експерти погодились з перспективністю таких моделей, зазначивши, що вони відкривають новий напрям досліджень. При цьому було акцентовано увагу, що аналіз необхідно проводити на капілярному рівні, тоді як знати лише картини розподілу механічного тиску буде замало.

Згідно з ухваленим порядком денним учасники засідання ESWG провели особисте *тестування можливостей розміщення членів екіпажу в дослідному зразку бронемашини Oshkosh JLTV*. При цьому було використане надане всім експертам бойове спорядження із засобами індивідуального бронезахисту. Як об'єкт тестування було задіяно модифікацію JLTV, випробування якої в морській піхоті США розпочалося в лютому 2017 року (має замінити машини HMMWV). Габаритні розміри JLTV (рис. 1): ширина – 242,1 см, довжина – 536,7 см, висота – 292,4 см, інтервал між центрами переднього та заднього коліс – 330 см, діаметр колеса – 107 см. Споряджена маса – 5,866 т, максимальна повна маса – 10,9 т. Встановлена автоматична коробка передач (наявні лише педалі гальмування та газу). Товщина дверної бронеплити – 30 мм. Слід зазначити, що в показаному дослідному зразку JLTV, який є зменшеним варіантом MRAP, сидіння членів екіпажу кріпляться до днища машини через спеціальні пари пружинних та телескопічних демпферів. Для поглинання енергії вибуху мін у ногах усіх членів екіпажу розташовуються пластико-повітряні поглиначі удару, що спрацьовують на зминання. У підвісці шасі використані еластомерні



Рис. 1. Дослідний зразок JLTV

демпфери (GBA 18) із запатентованою компанією Miner Elastomer Products Corporation (MEPC, minerelastomer.com) матеріалу TecsPak®, який у 10 раз довговічніше резини і в 20 разів міцніше уретану. У машині відсутнє дистанційне керування зброєю, тому крім 4 сидінь передбачене окреме місце для розташування стрілка у верхньому люкові, при цьому апаратний стіл виконує роль підставки для ніг. Механізм регулювання кліренсу дозволяє забезпечити горизонтальне положення машини при нахилах ґрунту до 40 град. Водій та командир мають смарт-дисплеї (DSDU (Driver Smart Display Unit) та CSDU відповідно), до яких можливе підключення USB-клавіатури та флеш-карт. Смарт-дисплеї типу SD7310 виготовлений компанією General Dynamics Canada Ltd (www.gdcanada.com), має діагональ 10,4 дюйма (1024x768 XGA), резистивний тач-скрін, вбудований процесорний модуль Intel® Core™2 Duo з частотою 1,6 ГГц, робочий діапазон температур від -46 до +71 град. Можливе використання більш потужних моделей SD7410, SD8010 (з 2015 року компанія отримала назву General Dynamics Mission Systems, Canada). Бортове живлення доступне в номіналах 12 В та 24 В постійного струму, наявна розетка на 120 В змінного струму. Між кріслами другого ряду передбачено підключення пристрою криптозахисту KGV-72, терміналу мережі MANET EPLRS (Enhanced Position Location Reporting System, швидкість передачі даних 2 Мб/с), супутникової навігаційної системи GB-GRAM (Ground-Based GPS Receiver Application Module), багатодіапазонного радіо. Вказані пристрої мають однотипні 6-контактні роз'єми. Усі антени розгортаються автоматично за командою з пульта. Рюкзаки розташовуються зовні машини в спеціальних нішах, у середині ж відведене місце для 2–6 ракет та боксів з 40-мм гранатами.

Особисті враження від перевірки можливості розміщення на сидінні водія JLTV у повній екіпіровці свідчать, що *проблема оптимізації сидінь та механізмів кріплення ще далека від остаточного вирішення*. Гострими лишаються проблеми термінової евакуації з кабіни в повній екіпіровці, компенсації збільшення габаритів тіла за рахунок наявності бронезиляка на спині (після видалення відповідного сегмента із спинки

крісел його подальше зберігання не продумане, обмежене відсування крісла від керма). Застосування нижнього центрального ремня в системі ременів безпеки фірми IMMІ здається травмонебезпечним і програє конструкції, анонсованій у доповіді представника Нідерландів, де була передбачена фіксація стегон.

Слід також вказати, що оптимальна для тривалої їзди підгонка крісел не відповідає їхній конфігурації, оптимальній для мінімізації часу на екстрену евакуацію. Тому *функцією майбутніх смарт-сидінь могло б бути не лише запам'ятовування оптимального для кожної людини налаштування параметрів крісел на тривалу їзду, а й окремої оптимальної конфігурації на випадок екстреної евакуації*. У такому разі попередньо визначена евакуаційна схема крісла, що налаштована під конкретного користувача, може бути моментально реалізованою за командою з пульта керування, щоб створити сприятливі умови для мінімізації часу на покидання машини та зайняття пішого бойового порядку.

Результати тестування JLTV засвідчили, що проблеми, якими займається група ESWG, не є надуманими і досить актуальні, незважаючи на сучасний арсенал передових технологій проектування. Відсутність прогресу в їхньому вирішенні з урахуванням відповідального підходу до пошуку компромісу в задоволенні ергономічних та безпекових вимог відкладає серійну закупку JLTV до прийняття виключно вольових рішень.

На завершення засідання ESWG його учасники сформулювали **основні завдання діяльності експертів робочої групи**:

1. Розробити стандартну методологію оцінки розміщення солдатів та членів екіпажу, у тому числі систем утримання (фіксації) тіла, у транспортних засобах (повітряних/наземних/морських), узагальнити інформацію про конструкції крісел, пристроїв фіксації, що використовуються державами-членами НАТО та країнами-партнерами. *Результат*: а) документ, що описує стандарт з оцінки; б) документ, який деталізує методологію оцінки; в) документ, що узагальнює конструкції крісел/пристроїв фіксації по країнах.

2. Розробити стандарт для отримання 3D-моделей солдатів на основі антропометричних даних держав-членів



НАТО (приклади підходів: а) параметричні статистичні моделі, б) моделі головних компонентів (PCA)). *Результат*: документ зі стандартними моделями (STANREC), що містить приклад комп'ютерного коду в API з відкритим вихідним кодом чи SDK, тестові дані і моделі для перевірки реалізації програмного забезпечення.

3. Запропонувати методологію створення моделей солдатів в екіпіровці для використання в комерційних САПР, що широко застосовуються інженерами в державному та приватному секторах промисловості, а також для оцінки необхідних просторових вимог відповідно даним параметричної статистики. *Проміжний результат*: документ, який узагальнює методологію за допомогою алгоритмів і приклад комп'ютерного коду для автономного API з відкритим вихідним кодом або SDK. Будуть надані приклади даних і моделей для перевірки реалізації програмного забезпечення (AEP).

4. Дослідження необхідних просторових вимог для екіпірованих солдатів з використанням навантажень, що базуються на сценаріях групи з навантаження солдата (Soldier Burden Group) панелі HFM (RTG-238) Організації НАТО з науки та технологій (STO) та групи SCAG LCG DSS. Опитування зацікавлених країн з метою формування переліку обладнання для підтримки

сценаріїв. *Результат*: документ, що містить детальний опис конфігурацій екіпіровки солдатів кожної з країн НАТО залежно від марки транспортного засобу та сценарію (STANREC і/або AEP) (*пропозиції щодо врахування сценаріїв бойових дій та типових навантажень для місії були надані представником України*).

5. Координація з більш широкою групою експертів з інтеграції систем людини (Human Systems Integration, HSI) щодо надання 3D-моделей та іншої антропометрії або інформації про людські чинники.

У результаті обговорення першочергових завдань була визначена потреба в розширенні кола експертів ESWG за рахунок операційних користувачів, спеціалістів з крісел та захисту машин, експертів з антропометрії та спорядження солдатів. Як найближче завдання було визначено необхідність оновити інформацію про наявні в країнах-учасниках стандарти з антропометрії (1D і 3D), відповідне обладнання для отримання антропометричних даних (1D і 3D) та наявний доступ до таких даних.

**В. І. Слюсар**, доктор технічних наук, професор (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

## Resume

### *MILITARY TECHNICAL POLICY*

**Pavlovskiy I. V.**, *Deputy Minister of Defence of Ukraine*  
(Ministry of Defence of Ukraine, Kyiv)

#### **KEY REFORMS OF THE SECURITY AND DEFENSE SECTOR AND THE RESULTS OF THEIR IMPLEMENTATION**

*The analysis of threats in the sphere of national security, the main tasks of increasing the level of the defense capability of the state and reforming the defense sphere was carried out. The aspects of management, decisive for ensuring national security of Ukraine, which require further implementation, are identified.*

**Keywords:** national security, level of defense capability, military aggression, reform of defense forces, management tools.

**Chepkov I. B.**, *Doctor of Technical Sciences, Professor,*  
**Zubarev V. V.**, *Doctor of Technical Sciences, Professor,*  
**Smirnov V. O.**, *Ph.D of Engineering, Senior Scientific Researcher*  
(Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kiev)  
**Sverhunov O. O.**, *Ph.D of Engineering, Associate Professor*  
(National Institute of Strategic Studies, Kiev)

#### **GLOBAL TRENDS IN BUILDING OF THE STATE POLICY AT IMPORTS OF ARMS IN CRISIS**

*Changes in the development of mechanisms for the implementation of the state policy for the import of arms have been analyzed in recent years as a result of global changes in the sphere of military-technical cooperation between states, as well as the existence of global economic, financial and political crises. A methodological approach is proposed to assess the effectiveness of state policy in the import of weapons, which is based on the method of expert assessments. The most important components of political, military-technical and economic mechanisms have been identified in the implementation of state policy for the import of arms in the sphere of military-technical cooperation between states.*

### *ARMORED VEHICLES*

**Bisyk S. P.**, *Ph.D. in Engineering Science, Senior Research Fellow,*  
**Chernozubenko O. V.**  
(Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv),  
**Shabitskiy V. R.**  
(615 military establishment Ministry of defense of Ukraine, Kyiv),  
**Slivinskiy O. A.**, *Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor*  
(Department of Welding KPI of I. Sikorsky, Kyiv)  
**Hanyukov V. A.**  
(military unit A2192, Gorodok)

#### **NUMERICAL SIMULATIONS OF HOMOGENEOUS PENETRATION OBSTACLES PROJECTILES WITH DIFFERENT FORM OF NOSE**

*The article presents the results of numerical simulations of homogeneous penetration obstacles projectiles with different form of nose. Determined stability, convergence and error solution using numerical models compared with known experimental data.*

## ARTILLERY WEAPONS &amp; SMALL ARMS

**Chepkov I. B.**, Ph. D., Professor

**Vaskivskyy M. I.**, Ph. D., Professor

**Bisyk S. P.**, Ph. D. in Engineering Science, Senior Research Fellow

**Sheremetov S. I.**

(Central Research Institute of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv)

**Korbach V. G.**, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor

(«State Kyiv Design Bureau» Luch «. Ukraine, Kyiv)

**RESEARCH BLAST MINES IN THE BARREL 120 MM MORTAR**

*The paper presents the results of numerical simulations blast mines in the barrel mortar and quality of experimental verification. The article is to study the impact and nature of mines blast mortar barrel with the use of numerical simulations and experimental testing them for use during the examination to determine the reasons for rupture of the barrel mortar. The study revealed the characteristics of destruction barrel mortars at undermining it one or two pounds. The observed fracture barrel mortar with numerical simulations and full-scale disruption in the area allows for destruction set the number of mines that exploded in the barrel that can be used during the examination to determine the reasons for rupture of the barrel mortar.*

**Keywords:** numerical simulations, 120 mm mortar, destruction barrel, blast mortar mines

**Zhuravliov O. O.**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor,

**Kolomiitsev O. V.**, Ph.D. in Engineering Science, Senior Research Fellow,

**Herasymov S. V.**, Doctor of Engineering Science, Senior Research Fellow,

**Chumak B. O.**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor

(Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, Kharkiv)

**METHOD OF ESTIMATION OF VALUE ERRORS COEFFICIENT OF FORCE OF HEAD-RESISTANCE OF PROJECTILE ON RESULTS OF EXTERNAL TRAJECTORY MEASURING**

*The method of estimation of error of calculation of values of coefficient of force of head-resistance of projectile, external trajectory measuring got with the use of results is worked out. Thus, speed and acceleration are calculated on the method of cube polynomials of the virtual systems of coordinates. The comparative analysis of estimations of sizes of instrumental errors that is got on results the external trajectory measuring of projectile the different stations is conducted.*

**Keywords:** instrumental errors, coefficient of force of head-resistance, station of the external trajectory measuring of projectile.

## RADIO-TECHNICAL FACILITIES

**Zhyvotovskiy R. M.**, Ph.D. in Engineering Science

(Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv)

**ANALYSIS OF ESTIMATION METHODS FOR CONTROL AND DATA CHANNELS IN AIR DEFENSE SYSTEMS**

*The article analyzed the known methods of assessment of the control and data channels in air defense systems that operate in conditions of active electronic suppression. The advantages and disadvantages of the known methods are analyzed.*

**Keywords:** electronic environment, intentional interference, air defense, methods of analysis.

**Kucher D. B.**, *Doctor of Engineering Science, Professor*  
(National University «Odessa Maritime Academy» , Odessa),  
**Fyk O. I.**, *Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor*,  
**Honchar R. O.**, *Ph.D. in Military Sciences*  
(National Academy of the National Guard of Ukraine , Kharkiv)

### **MODELING OF THE PROCESS OF FORMATION OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD BY SUPERCONDUCTING FRACTAL FREQUENCY-SELECTIVE GRATINGS IN THE COMPOSITION OF FLAT TWO-MIRROR ANTENNAS**

*The results of numeral researches are presented in the article of multifrequency, frequency-electoral, fractal superc surfaces, obtained by means of mathematical model of multi-layered electrodynamic structure of flat bi-periodic grates of elements in composition two-mirror aerals.*

### *AIRCRAFT ARMAMENT & FACILITIES*

**Voitenko S. D.**, *Ph.D. in Engineering Science, Senior Research Fellow*,  
**Zholobov O. V.**, *Ph.D. in Engineering Science*  
(National Aviation University)

### **SUBSTANTIATION OF FUNCTIONAL DESIGN OF THE PROMISING SUSPENSION CONTAINERS WITH OPTICAL-ELECTRONIC INTELLIGENCE**

*The following article is about experience of use of suspension containers with optical-electronic intelligence in military aircrafts of leading countries. The relevance of development and procurement of containers for military forces of Ukraine have been determined. Functional scheme for long-term container for needs of military forces of Ukraine has been built.*

### *UAV*

**Kuchеров D. P.**, *Doctor of Science*  
(National Aviation University),  
**Kozub A. M.**, *Ph.D, associate professor*  
(National University of Defense of Ukraine called I. Chernyakhovskogo),  
**Kostyna O. M.**, *Ph.D, associate professor*  
(Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv)

### **MOVEMENT OF THE MULTI AGENT SYSTEM IN POTENTIAL FIELD**

*The article deals with the movement of a multi-agent system consisting of a limited number of UAVs. The multi-agent system includes a lead agent and several agents-members of the group. The motion of this system occurs along a trajectory, which is determined by the initial conditions, its mathematical model and obstacles on the route. Only the leader of the group knows the ultimate goal of the movement. The motion of this structure is considered in the potential field, which is determined by the forces of attraction and repulsion and is created by control signals by measuring the distances to the nearest neighbors. This allows the UAV group to consider an aggregate that has some size and to describe its motion the system of differential equations of second-order. In this paper, the stability conditions of such motion are investigated, and the proposed approach is modeled.*

**Keywords:** *group control, potential field, UAV, control law*

## COMMUNICATIONS MEANS

**Shefer O. V.**, *Ph.D. in Engineering Science*, associate professor  
(Poltava National technical Yuri Kondratyuk University)

### THE PROSPECTS AND PECULIARITIES OF PLASMA WITH HOLLOW CATHODE USING FOR SATELLITE TELECOMMUNICATIONS NOISE STABILITY INCREASE

*In this article the main advantages and the peculiarities of artificially created plasma environment using are shown with the purpose of compensation of the external plasma membrane for the increase of satellite telecommunications noise stability. The overall pattern of effect is set in the plasma hollow cathode for the creation of noise stability environment, which depends on the conditions of energy's fast electrons creation during their oscillatory motion, positive ions, fast neutral particles, metastable atoms and photons.*

## NAVY ARMAMENT &amp; EQUIPMENT

**Leiko O. H.**, *Doctor of Engineering Science*

(National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"),

**Derepa A. V.**, *Ph.D. in Engineering Science*,

**Kocharian O. O.**, *Researcher*

(Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv)

### ACOUSTIC PROPERTIES OF INFORMATION HYDROACOUSTIC SYSTEM «MARINE ENVIRONMENT-SURFACE VESSEL-HYDROACOUSTIC STATION» AND WAYS TO INFLUENCE THEM

*The paper presents the results of studies of acoustic features of arrangement of hydroacoustic information on underwater situation in the marine environment, acoustic features of a surface vessel as a carrier of facilities for obtaining hydroacoustic information on underwater situation, acoustic features of sonar armament as the primary source of obtaining hydroacoustic information in the underwater surveillance system, the possibility of influencing them with the aim to improve the efficiency of the considered information hydroacoustic system has been analyzed.*

**Rozhonayev S. N.**, *PhD in Engineering Science, Senior Research Fellow*,

**Chabanenko P. P.**, *Doctor of Military Science, Professor*

(Central Research and Development Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv)

### INCREASING INFORMATIVITY AND INVARIANCE OF CLASSIFICATION EVIDENCES OF RADAR SIGNALS THAT WERE REFLECTED FROM SHIP

*Research was performed in order to increase the effectiveness of classification and main target isolation by radar sensors taking into account the ship aspect ratio while exposure by radar signals.*

**Keywords:** effective echoing ratio, ship, invariance, amplitude, pulse duration.

## PRODUCTION, MODERNIZATION, MAINTENANCE

**Shyshanov M. O.**, *Doctor of Engineering Science, Professor*,

**Huliaiev A. V.**, *Ph.D. in Engineering Science, Senior Research Fellow*,

**Zubarev O. V.**, *Ph.D. in Engineering Science, Senior Research Fellow*,

(Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine)

**Shevtsov M. M.**, *Head of the Armament of the Armed Forces of Ukraine*

## **METHODOLOGY OF THE SUBSTANTIATION OF THE TACTICAL AND TECHNICAL REQUIREMENTS TO TECHNICAL RECOVERY MEANS**

*The article proposes a methodical approach to the development of the tactical and technical requirements for technical means of weapons and military equipment recovery, which allows substantiating the development tendencies and designing principles of mobile means of maintenance and repair of weapons and military equipment.*

### *UNCONVENTIONAL WEAPONS*

**Kucher D. B.**, *Doctor of Engineering Science, Professor,*  
**Smyrynska N. B.**, *Senior Research Fellow*  
(*National University «Odessa Maritime Academy», Odessa*)

## **FEATURES OF CONSTRUCTION OF DEVICE FOR FORMING THE SEQUENCE OF POWERFUL ELECTROMAGNETIC RADIATIONS IN SYSTEMS OF LIMITED VOLUME**

*The concept of construction, formation and stages of triggering the element of the device which forms the sequence of impulse actions considering its disposition in the limited volume systems is studied and displayed in the article.*

**Keywords:** *powerful electromagnetic radiation, explosive magnetic generator, electrically exploding conductor, secondary breakdown of detonation products, fast electrical explosion of conductors, commutator, impulse sequence generation device.*

## **ШАНОВНІ АВТОРИ!**

Оскільки пріоритетним завданням науково-технічного журналу «Озброєння та військова техніка» є входження до двох найавторитетніших у світі реферативних баз даних Scopus та Web of Science, редакція вводить нові (додаткові) вимоги до оформлення статей.

### **Додаткові вимоги до списку літератури («References»)**

Список літератури повинен включати мінімум 10 джерел. Із них не менше 3-х джерел мають бути іноземні (латиницею).

Не авторські джерела (закони, постанови, накази, інші офіційні джерела, неопубліковані документи тощо) можуть бути включені до списку, але не враховуються в названий мінімум.

Джерела в списку наводяться й нумеруються в порядку їх цитування в тексті.

### **Додаткові вимоги до авторських резюме**

Авторське резюме до статті є основним (часто самостійним і незалежним від основного тексту) джерелом інформації у міжнародних базах даних, в яких індексується журнал. З авторського резюме читач має чітко зрозуміти сутність дослідження й вирішити, чи варто звертатися до повного тексту статті для отримання детальної інформації.

### **Авторські резюме (англійською, українською та російською мовами) повинні:**

Містити не менше 150, але не більше 300 слів.

Коротко повторювати структуру статті (цілі й завдання дослідження, методи, результати, висновки).

Не містити посилань на літературу та аббревіатур (якщо це можливо).

---

Формат 60 x 84 1 / 8. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний.  
Обсяг 16,25 ум. др. арк., 10,20 обл.-вид. арк. Наклад 250 прим. Зам. № 1604-2.

**Видавничий дім Дмитра Бураго**

Свідоцтво про внесення до державного реєстру ДК № 2212 від 13.06.2005 р.  
04080, Україна, м. Київ-80, а / с 41

**Тел. / факс:** (044) 227-38-28, 227-38-48; **e-mail:** [info@burago.com.ua](mailto:info@burago.com.ua), **site:** [www.burago.com.ua](http://www.burago.com.ua)