Центральний науково-дослідний інститут
Збройних Сил України
Military Science. Vol. 1 No. 1. 2023

Математична модель та алгоритм оцінювання ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю в умовах перешкод та протидії їм в повітряному бою

Сергій Островський
кандидат військових наук,
начальник науково-дослідного центру математичного моделювання
воєнних і невоєнних заходів
Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України
03049, Повітрофлотський проспект, 28 Б, Київ, Україна
e-mail: ostrovserg@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4702-9808

Олег Каблуков
кандидат військових наук,
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України
03049, Повітрофлотський проспект, 28 Б, Київ, Україна
e-mail: okablukov@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8611-0849

Анотація. Розвиток та практична реалізація нових способів активної протидії станціям перешкод противника в повітряному бою зумовлюють необхідність урахування їх впливу на загальну ефективність функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю, що потребує удосконалення існуючих математичних моделей опису їх функціонування в умовах перешкод та одночасної активної протидії. Автор у статті описав удосконалену математичну модель оцінювання ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю у повітряному бою для забезпечення живучості літака-винищувача та надійного виконання ним бойового завдання. Проведено аналіз сучасних бортових радіолокаційних систем та станцій активних перешкод як об'єктів математичного моделювання, способів активної протидії бортовим станціям перешкод противника та існуючих математичних моделей функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю. Сформовані вихідні дані щодо математичного моделювання функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю в умовах перешкод з одночасною протидією станціям перешкод противника та наведено обрану ситуацію повітряного бою, яка підлягає математичному опису. Було обрано показники та критерії, що характеризують ефективність функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю, основним з яких є обмеження по дальності їх використання в залежно від способу протидії, що застосовується. Проведені попередні розрахунки щодо застосування зазначених способів активної протидії. Ураховуючи особливості застосування способів протидії станціям перешкод противника, запропоновано поділити цикл повітряного бою між літаками на 5 етапів залежно від дальності між ними. Розроблено алгоритм обґрунтування вибору способів протидії станціям перешкод противника, зважаючи на дальність між літаками для безперервного супроводження цілі та визначені ймовірності супроводження цілі з урахуванням застосування різних комбінацій способів протидії. Для якісної та повної оцінки ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю

запропоновано використовувати нечіткі множини та теорію ігор, за допомогою яких побудована математична модель оцінювання ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю в умовах протидії станціям перешкод противника, яка застосовувалась під час розроблення алгоритму та вибору найефективнішої комбінації способів протидії.

Ключові слова: ефективність функціонування, управління зброєю, математичне моделювання, станція перешкод.

Вступ (Introduction)

Досвід локальних війн і конфліктів показує, що авіація без засобів радіоелектронної боротьби має дуже низьку живучість. Застосування станцій активних перешкод індивідуального захисту (САП ІЗ) літаків доводить ймовірність не ураження літака в повітряному бою до 45–75 %, а комплексне застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) дозволяє довести цю ймовірність до 80–95 %. Таким чином, у зв'язку з важливістю завдань, які виконуються бортовими засобами РЕБ, та їх ефективністю останнім часом все більш активно почали досліджуватись питання радіоелектронної протидії самим засобам РЕБ – так званої контррадіоелектронної протидії (КРЕП).

Сьогодні для боротьби зі САП ІЗ існує низка способів протидії їм, використання яких має випадковий характер. Проте проведений аналіз їх застосування свідчить про те, що більшість способів активної протидії мають різні умови застосування, які пов'язані зі змінами роботи бортових радіолокаційних станцій управління зброєю (БРЛС УЗ), що накладає на них обмеження по дальності використання.

Розвиток та практична реалізація нових способів активної протидії станціям перешкод противника в повітряному бою зумовлюють необхідність урахування їх впливу на загальну ефективність функціонування БРЛС УЗ, що у свою чергу, викликає потребу в удосконалені існуючих математичних моделей опису функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод та одночасної активної протидії їм.

Тому для подальшого розвитку радіоелектронної протидії станціям перешкод противника слід удосконалювати математичні моделі оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ як в умовах перешкод, так і одночасної протидії їм з метою формування чітко визначеного алгоритму застосування розроблених та практично реалізованих способів протидії. Ураховуючи зазначене, метою статті є розроблення удосконаленої математичної моделі оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ у повітряному бою.

Методологічна основа (Methodological Framework)

Останні дослідження і публікації з розглядуваної тематики (Андросов, Кутахов, 1996), (Семененко, 2015), (Семененко, Водчиць, Добровольський, 2011), (Василевич, 1989), (Семененко, Каблуков, Мироненко, Добровольський, 2019), (Перунов, Мацукевич, Васильев, 2010), (Семененко, Каблуков, Чернега, 2019), (Семененко, Сорокін, Добровольський, Каблуков, 2019), (Василевич, 2000) показують, що переважна більшість математичних моделей, які описують процеси взаємодії засобів РЕБ та радіолокації, призначені для оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод без активної протидії їм (Андросов, Кутахов, 1996), (Семененко, 2015), (Семененко, Водчиць, Добровольський, 2011).

Окремими випадками є моделі, які дозволяють оцінювати ефективність застосування тих чи інших пасивних засобів захисту БРЛС УЗ від окремих видів перешкод (Василевич, 1989), (Семененко, Каблуков, Мироненко, Добровольський, 2019), (Перунов, Мацукевич, Васильев,

2010).

Роботи (Семененко, Каблуков, Чернега, 2019), (Семененко, Сорокін, Добровольський, Каблуков, 2019) присвячені лише способам активної протидії КРЕП, які мають різні умови їх застосування та пов'язані зі змінами роботи БРЛС УЗ, що накладає на них обмеження по дальності використання.

У роботі (Василевич, 2000) автор зазначає, що процес протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ відбувається в умовах стохастичної невизначеності перешкодової обстановки через відсутність повної інформації про ведення КРЕП, про характеристики САП ІЗ противника, невідомі умови ведення повітряного бою, відсутність практичних оцінок перешкодозахищеності БРЛС при веденні КРЕП на певних етапах бою.

У процесі протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ програмної інженерії є низка методів оцінювання щодо витрат програмного забезпечення (Кірсанов, Сагун, 2014), (Потрап, Кривоножко, 2022), (Андон, Ігнатенко, Сініцин, Слабоспицька, 2016), (Офіційний сайт Центру системної та програмної інженерії Університету Південної Каліфорнії, 2022), (Information technology – Software measurement – Functional size measurement – Part 1: Definition of concepts ISO, 2022), (Корегін, Чік, 2020). Авторами запропоновано класифікація таких методів, відповідно до якої вони поділені на емпіричні та аналітичні. Емпіричні методи базуються на емпіричних твердженнях, принципах, припущеннях, які сформовані на основі цілеспрямованого вивчення, спостереження за ходом проєктів з розроблення програмного забезпечення, вимірюваннях окремих його кількісних характеристик, що мають відношення до вартості. Аналітичні методи базуються на використанні аналітичних виразів, аналітичних моделей, які описують залежність кількісних характеристик програмного забезпечення і витратами на його розробку Відповідно до запропонованої авторами класифікації до емпіричних методів віднесено:

метод експертних оцінок, у якому оцінка вартості програмного забезпечення здійснюється окремим спеціалістом (експертом) або групою експертів, що мають відповідний досвід та дані щодо: попередніх подібних проєктів, спроможностей компаній-розробників, наукових досягнень та сфери застосування щодо програмного забезпечення, використання декількох методів розрахунку вартості;

метод аналогій, що передбачає проведення порівняння з аналогічними проєктами у галузі розроблення програмного забезпечення процесу протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ; результатом є скоригована величина вартості, що оцінюється з урахуванням кількісних і якісних відмінностей;

оцінка за Паркінсоном, метод, в основу якого покладено закон Паркінсона - об'єм роботи зростає в тій мірі, в якій необхідно, щоб зайняти час, виділений на її виконання. Згідно із цим законом зусилля, витрачені на роботу, розподіляються рівномірно за виділеним на проєкт часом. Критерієм для оцінки витрат на програмне забезпечення процес протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ є людські ресурси;

метод Price-to-win базується на принципі "клієнт завжди правий". Суть методу полягає в тому, що незалежно від передбачуваних реальних витрат на розробку проекту, оцінка вартості програмног забезпечення залежить від бюджету замовника, а не від функціональних характеристик програмного забезпечення процес протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ, що розробляється.

Для проведення порівняльного аналізу методичних підходів обрано порядок, що складається з таких етапів (Сурмін, 2006), (Гусак, Кірсанов, Островський, 2021):

визначення мети порівняльного аналізу;

відбір методичних підходів для порівняльного аналізу;

вивчення методичних підходів, збір необхідної інформації про їхні переваги та недоліки, про відмінності між ними;

визначення критеріїв (показників) порівняльного аналізу;

проведення порівняльного аналізу на основі визначених критеріїв (показників);

формування висновків (рекомендацій) за результатами порівняльного аналізу.

Метою порівняльного аналізу методичних підходів оцінювання витрат на розроблення програмного забезпечення є розроблення рекомендацій щодо вибору методичного підходу, за допомогою якого можна обґрунтувати витрати на розроблення програмного забезпечення для потреб ЗС України.

Четвертий етап методичного підходу передбачає обґрунтування порядку реалізації процесу управління військами типу C4ISR протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ (Гусак, Кірсанов, Островський, 2021).

На цьому етапі розглядаються особливості побудови та функціонування типу C4ISR з точки зору кібернетики, а саме щодо:

забезпечення цілеспрямованості (чіткого здійснення визначеної мети) управління;

використання причинно-наслідкових та зворотних зв'язків між елементами (засобами автоматизованого управління, їх комплексами);

урахування впливу на елементи зовнішнього середовища (дій противника, фізико-географічних умов району операції), який призводить до стохастичності процесу управління військами;

наявності обміну інформацією між елементами як обов'язкової умови її функціонування та збереження цілісності;

динамічного характеру процесу управління, який здійснюється в (постійної зміни стану у часі відповідно до інтенсивності потоку інформації, який виходить на кожному етапі циклу управління військами).

З метою досягнення сумісності структур ЗС України з відповідними структурами держав – членів НАТО у червні цього року Генеральним секретарем НАТО підписано оновлені Цілі партнерства Україна – НАТО 2021 (NATO UNCLASSIFIED, 2021). Ціллю G 1000 є необхідність проведення підготовки та оцінювання підрозділів ЗС України, які може бути призначено для участі у багатонаціональних операціях, у тому числі операціях, які здійснюються під керівництвом НАТО відповідно до концепцій, доктрин, стандартів та процедур Об'єднаних сил НАТО.

Таким чином, здійснення порівняльного аналізу підходів до оцінювання ОВУ ЗС України та Об'єднаних сил НАТО є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що існує декілька підходів до оцінювання ОВУ ЗС України та Об'єднаних сил НАТО викладених в методиках, інструкціях, методичних рекомендаціях, доктринах, настановах, стандартах Об'єднаних Сил НАТО (Handbook "Operational capabilities concept valuation and feedback (OCC E&F) programme", 2020), (Allied Command Operations Forces Standards Volume VII, 2020). При цьому кожен із підходів оцінювання ОВУ має свої суттєві відмінності.

Проте дослідження та публікації щодо оцінювання рівня відповідності керівних документів ЗС України керівним документам Об'єднаних Сил НАТО, щодо оцінювання ОВУ, а також результати порівняльного аналізу підходів до оцінювання ОВУ ЗС України та Об'єднаних Сил НАТО відсутні.

З даної тематики (Комаров, 2019), (Пат. 109226, Комаров, Ткаченко, Галушка, 2016) показує, що у переважній більшості літератури висвітлюються статистичні методи аналізу та діагностування авіаційної техніки, проте під час розгляду цих питань не приділяється увага випадкам надійності роботи літаків.

Майже не звертається увага на використання способів та підходів до контролю частоти власних коливань під час вибору методу відновлення авіаційної техніки, а також на методики щодо визначення запасу міцності бойових літаків на основі аналізу динамічних характеристик.

Результати і обговорення (Results and Discussions)

Структурно-логічна схема застосування удосконаленої математичної моделі оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ складається із п'яти етапів.

На першому етапі сформовані вихідні дані щодо моделювання функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод та протидії САП ІЗ противника. Обрано ситуацію повітряного бою, яка підлягає математичному опису (рис. 1), та чотири способи КРЕП, що використовуються під час протидії станціям перешкод противника, а саме: 1-ий та 2-ий способи – "Здійснення протидії станції активних перешкод противника шляхом зміни поляризації сигналу на прийомі БРЛС УЗ"; 3-ій – "Здійснення протидії станції активних перешкод противника шляхом зміни потужності опромінюючого сигналу БРЛС УЗ"; 4-ий – "Здійснення протидії станції активних перешкод противника шляхом порушення регулярності опромінення".

На другому етапі обрано показники та критерії (таблиця 1), які характеризують ефективність функціонування БРЛС УЗ, з урахуванням яких проведені попередні розрахунки.

Було розраховано обмеження щодо застосування обраних способів активної протидії, основним критерієм обмеження є дальність їх використання залежно від способу КРЕП, який застосовується.

Розрахунки свідчать про те, що при застосуванні 1-го та 4-го способів максимальна дальність зменшується на 4 %; при застосуванні 2-го або 3-го способів – на 16 %, а під час застосування усіх чотирьох способів – на 20 %.

Критерієм ефективності функціонування БРЛС в умовах перешкод та одночасної протидії їм обрано ймовірність супроводження цілі (таблиця. 1).

Для підвищення ефективності функціонування БРЛС потрібно переглянути послідовність ведення повітряного бою із урахуванням особливостей застосування способів радіоелектронної протидії станціям перешкод противника. Тому запропоновано поділити безпосередньо цикл повітряного бою між літаками на 5 етапів залежно від дальності (рис. 2).

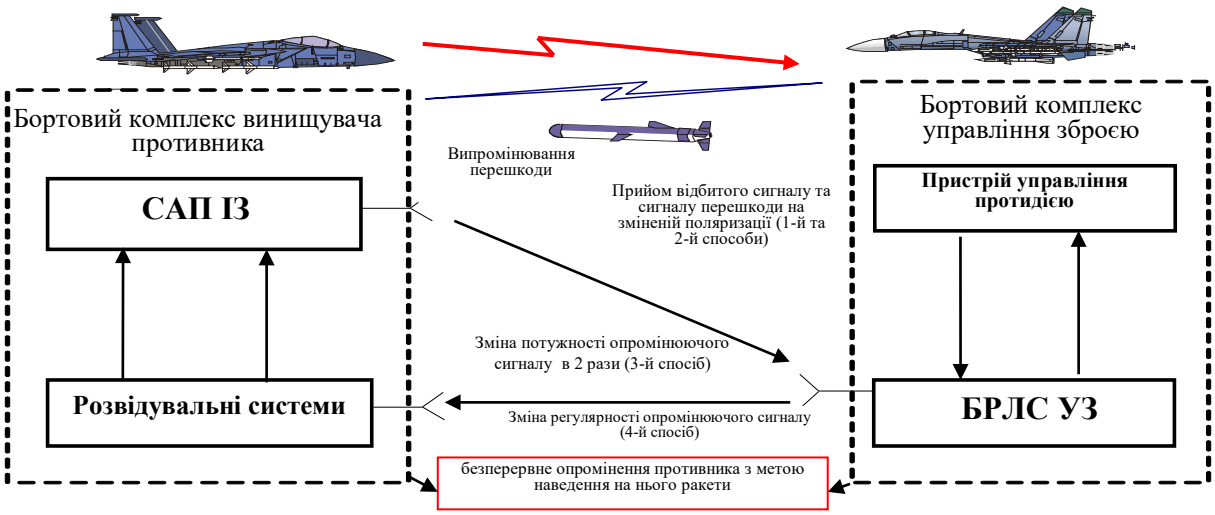


Рисунок 1. Ситуація повітряного бою

Далі розроблено алгоритм обґрунтування вибору способів протидії станціям перешкод противника для безперервного супроводження цілі з урахуванням дальності між літаками. А також визначені ймовірності супроводження цілі з урахуванням застосування різних комбінацій способів протидії та відповідних коефіцієнтів протидії (рис. 3).

Розроблений алгоритм удосконалює існуючий підхід функціонування бортової РЛС УЗ за показником ймовірності супроводження цілі в умовах застосування запропонованих

способів протидії станціям перешкод противника та враховуючи обмеження щодо їх застосування.

Таблиця 1. Показники функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод

Показники та критерії	Без урахування протидії САП ІЗ противника	З урахуванням протидії САП ІЗ противника
Дальність виявлення цілі	$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{N_c G_c G_n \sigma_ц \lambda^2}{64 \pi^3 N_{c\,вх}}}$,	$D = \sqrt[4]{\frac{N_c G_c \lambda^2 G_n \sigma_ц}{64 \pi^3 N_{c\,вх}} \cdot \cos^2 \Delta\beta}$
Дальність застосування режиму безперервної пеленгації	$D_{РБП} = \beta \cdot D_{\max}$, $\beta = f\begin{pmatrix} W_{XT} = 0{,}5\left[1-\Phi(q_0)\right], \\ W_{ПВ} = \left[1+\Phi(q-q_0)\right] \end{pmatrix}$	не змінюється
Відношення сигнал / шум на вході приймача БРЛС УЗ	$\frac{N_{c\,вх}}{N_{n\,вх}} = \frac{N_{c\,вх} G}{\left(N_{n\,вх} + N_ш\right) G^k}$	$\frac{N_{c\,вх}}{N_{n\,вх}} = \frac{N_{c\,вх} \cdot G + N_n \cdot G \sin^2 \Delta\beta}{\left(N_{n\,вх} + N_ш\right) \cdot G^k \cos^2 \Delta\beta}$
Потужність корисного сигналу на вході приймача БРЛС УЗ	$N_{c\,вх} = \frac{N_c G_c}{4\pi D^2} \frac{\sigma_ц}{4\pi D^2} \frac{\lambda^2 G_n}{4\pi}$	$N_{c\,вх} = \frac{N_c G_c}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_n}{4\pi} \cdot \frac{\sigma_ц}{4\pi D^2} \cdot \cos \Delta\beta \pm$ $\pm \frac{N_n G_c}{4\pi D^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_n}{4\pi} \cdot \frac{\Delta f_{прм}}{\Delta F_n} \cdot \alpha \cdot \sin \Delta\beta$
Коефіцієнт подавлення БРЛС	$\frac{N_n G_n}{N_c G_c} \frac{\Delta f_{ПРМ} 4\pi \alpha F_c\left(\theta_ц, \beta_ц\right)}{\Delta F} \cdot D^2 \geq K_n$	$K_n \geq \frac{N_{n\,вх} G^k \cos \Delta\beta}{N_{c\,вх} G \cos \Delta\beta + \alpha N_{n\,вх} G \sin \Delta\beta}$
Ймовірності супроводження цілі	$P_{зриву} = 1 - \prod_{i=1}^{4}(1-P_i)$;	$P'_{зриву} = 1 - \prod_{i=1}^{4}\left(1 - k_i^{пр} P_i\right)$
	$P_{супр} = 1 - P_{зриву}$ – обрано критерієм ефективності функціонування БРЛС	

де N_c ($N_{c\,вх}$) – потужність сигналу передавача та сигналу на вході антени; G_c (G_n) – максимальний коефіцієнт підсилення антен БРЛС та САП ІЗ; λ – робоча довжина хвилі; $\sigma_ц$ – ефективна площина розсіювання цілі; $\Delta\beta$ – кут зміни площини поляризації; W_B – ймовірність виявлення; W_{XT} – ймовірність хибної тривоги; $\Delta f_{прм}$ – смуга пропускання приймача БРЛС; ΔF_n – смуга випромінювання сигналу перешкоди; $F_c(\theta_ц,\beta_ц)$ – нормована діграма спрямованості антени по потужності БРЛС; α – коефіцієнт, який враховує незбіжності поляризації антени САП ІЗ та РЛС, яка подавляється; K_n – коефіцієнт подавлення; $P_{зриву}$ – ймовірності зриву; $P_{супр}$ – ймовірності супроводження цілі; $k_i^{пр}$ – коефіцієнт ефективності протидії.

Джерело: розроблено автором з урахуванням (Семененко, Водчиць, Добровольський, 2011), (Семененко, Каблуков, Мироненко, Добровольський, 2019), (Семененко, Каблуков, Чернега, 2019), (Семененко, Сорокін, Добровольський, Каблуков, 2019).

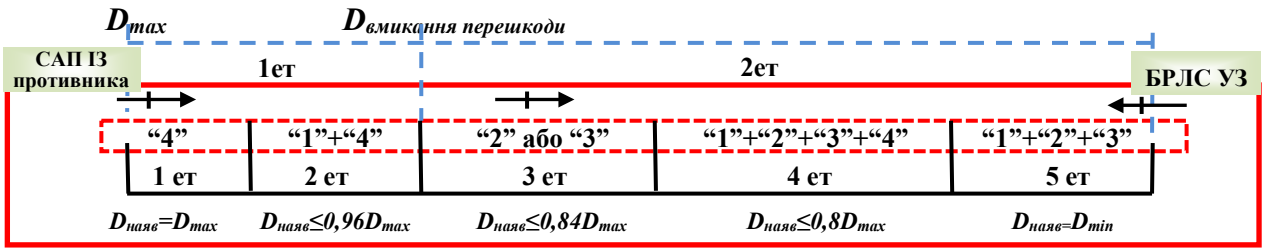


Рисунок 2. Етапи ведення повітряного бою

Для якісної та повної оцінки ефективності функціонування БРЛС УЗ запропоновано використовувати нечіткі множини та теорію ігор. Застосування нечітких шкал оцінювання викликано фактором відсутності чітких оцінок ефективності застосування різних видів перешкод та способів протидії їм, а також природною невизначеністю повітряного бою [9]. У

повітряному бою є ситуації, в яких відомі можливі стратегії застосування САП ІЗ противника, але невідомо, яка з відомих стратегій має місце у даний час, тобто можуть бути відомими дані про типи літаків-винищувачів та засоби протидії, які встановлені на цих літаках, а також варіанти їх застосування, але невідомо у даний час, які види перешкод він зараз створює, чи ввімкнена взагалі САП ІЗ на випромінювання та подальші варіанти продовження бою.

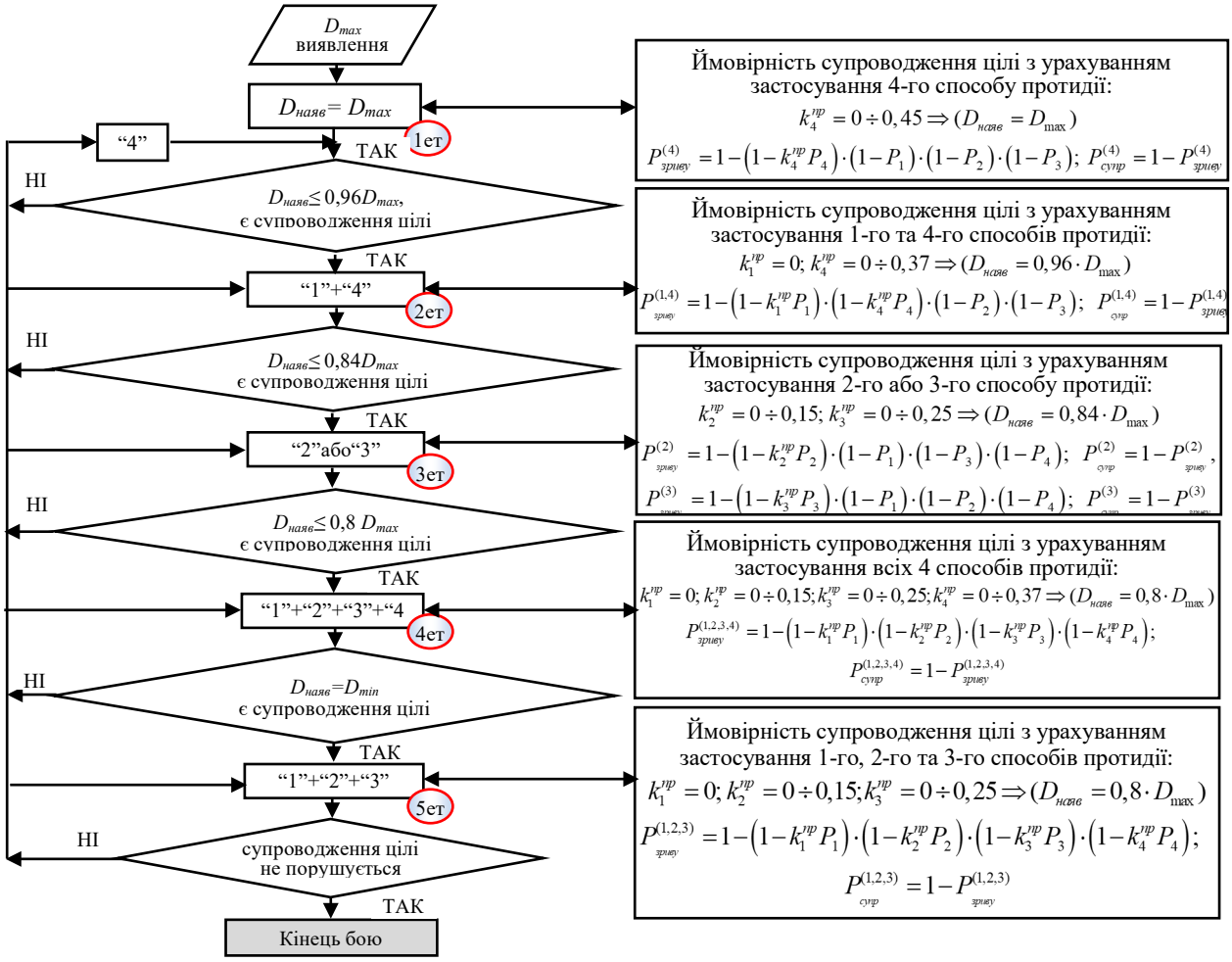


Рисунок 3. Алгоритм обґрунтування вибору способів протидії

На рисунку 4 наведена математична модель оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ у повітряному бою, яка застосовувалась під час розроблення алгоритму та вибору найефективнішої комбінації способів протидії. На нашу думку, математичну модель опису оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод та одночасної протидії САП ІЗ доцільно представити у вигляді нечіткої матричної гри, яка є найбільш адекватною для описання такої ситуації щодо БРЛС УЗ літака-винищувача та САП ІЗ противника в умовах здійснення їх активної протидії.

Запропонована математична модель дозволяє оцінити ефективність роботи БРЛС УЗ в умовах перешкод і одночасної протидії їм та має вид матриці ефективності $|a_{ij}|$, де елементами матриці є a_{ij} – нечіткі оцінки ефективності роботи БРЛС УЗ, а саме показники ймовірності супроводження цілі для кожного її рішення щодо застосування способів протидії A_i та кожного стану середовища B_j щодо випромінювання перешкод САП ІЗ.

Результатами рішення матричної гри на кожному етапі запропонованого алгоритму є

оцінки ефективності БРЛС УЗ на визначених етапах ведення повітряного бою за різних умов її застосування – як в умовах перешкод, так і в умовах одночасної протидії їм. Загальна оцінка за різного стану середовища повітряного бою розраховується за формулою повної ймовірності. За формулою (1) розраховується оцінка ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод без протидії САП ІЗ противника, за формулою (2) – з урахуванням протидії.

$$E_{супр}^{без\ КРЕП} = \sum_{i=1}^{2} P_{супр.i} \cdot P(П_i) = P_{супр.1}(a_{12}) \cdot P(П_1) + P_{супр.2}(a_{21}) \cdot P(П_2)\ , \quad (1)$$

$$E_{супр}^{КРЕП} = \sum_{j=1}^{2} P_j \cdot P(П_j) = P_{супр.1}(a_{11}) \cdot P(П_1) + P_{супр.2}(a_{22}) \cdot P(П_2)\ . \quad (2)$$

де $П_{1,2}$ – ситуація стану САП ІЗ (вмик. та вимк.)

$$A = \|a_{ij}\| = \begin{matrix} & B_1 & B_2 \\ A_1 & a_{11} & a_{12} \\ A_2 & a_{21} & a_{22} \end{matrix} = \begin{vmatrix} \{0,65;0,7;0,75;0,8\} & \{0,15;0,2;0,25;0,3\} \\ \{0,05;0,1;0,15;0,2\} & \{0,8;0,85;0,9;0,95\} \end{vmatrix}$$

рішення за приблизним (ітераційним) методом

$$S_A \approx \left|\frac{15}{30};\frac{15}{30}\right|,\ p_1 = \frac{m^*_i}{n_\Sigma} = 0{,}5;\ p_2 = \frac{m^*_i}{n_\Sigma} = 0{,}5,\ S_B \approx \left|\frac{11}{30};\frac{19}{30}\right|,\ q_1 = \frac{n^*_i}{n_\Sigma} = 0{,}37;\ q_2 = \frac{n^*_i}{n_\Sigma} = 0{,}63.$$

$$\nu_A = \frac{\alpha+\beta}{2} \approx \frac{\alpha_{\sum_{\min}} + \beta_{\sum_{\max}}}{2 \cdot k} \approx \{0{,}42;0{,}47;0{,}52;0{,}57\},$$ де $\alpha_{\sum_{\min}}, \beta_{\sum_{\max}}$ *ціна гри гравців А (БРЛС УЗ) та В (САП ІЗ)*

Рисунок 4. Математична модель оцінювання ефективності функціонування БРЛС

Висновки (Conclusion)

Таким чином, удосконалена математична модель оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ дозволяє здійснити її обґрунтований опис в умовах перешкод та одночасної активної протидії станціям перешкод противника, що дозволить, за попередніми розрахунками, підвищити ефективність функціонування БРЛС УЗ на 14–33 відсотка, а також ураховувати невизначеність ситуації, яка складається під час ведення повітряного бою.

Розроблений алгоритм удосконалює існуючий підхід функціонування БРЛС УЗ за показником ймовірності супроводження цілі в умовах застосування ефективної комбінації запропонованих способів протидії станціям перешкод.

Рекомендації (Recommendations)

Подальші дослідження доцільно спрямувати на удосконалення методу математичного моделювання функціонування БРЛС УЗ в умовах активної протидії станціям перешкод противника, а також надання рекомендацій щодо впровадження удосконаленої математичної моделі під час модернізації винищувачів Повітряних Сил Збройних Сил України з урахуванням різних видів перешкод та появи нових способів протидії.

Використані джерела

1. Андросов В. А., Кутахов В. П. Архитектура аппаратурно-интегрированного радиоэлектронного комплекса // Радиотехника. Москва. 1996. № 9. С. 48–52.
2. Семененко О. М. Аналіз існуючих способів активної радіоелектронної протидії

бортовим станціям активних перешкод індивідуального захисту // ДНДІА. Київ. 2015 . № 11 (18). С. 120–129.
3. Семененко О. М., Водчиць О. Г., Добровольський Ю. Б. Спосіб контррадіоелектронної протидії літаковій станції перешкод противника під час створення нею поляризаційної перешкоди, що наводиться // ЗНП ЦНДІ ЗС України. Київ. 2011. № 4 (58). С. 123–134.
4. Василевич Л. Ф. Радиоэлектронное подавление. Київ: КВВАИУ, 1989. 243 с.
5. Семененко О. М., Каблуков О. А., Мироненко В. С., Добровольський Ю. Б. Аналіз бортових станцій активних перешкод індивідуального захисту літаків противника, як можливих об'єктів радіоелектронної протидії // ЗНП ЦНДІ ЗС України. Київ. 2019. № 1 (87). С. 98–109.
6. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / под ред. Ю. М. Перунова: в 4 кн. Кн. 1. Радиолокационные системы. Москва: Радиотехника, 2010. 336 с.
7. Семененко О. М., Каблуков О. А., Чернега В. М. Шляхи створення інтегрованого радіолокаційно-перешкодового комплексу на літаках-винищувачах ЗС України // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони: науковий журнал. Київ. 2019. № 2 (35). С. 43–48.
8. Семененко О. М., Сорокін Д. М., Добровольський Ю. Б., Каблуков О. А. Рекомендації щодо вибору математичної моделі оцінювання ефективності контррадіоелектронної протидії бортовій станції перешкод противника в повітряному бою // ЗНП ДНДІА. Київ. 2019. № 15 (22). С. 181–188.
9. Василевич Л. Ф. Теория игр. Київ: Наша справа, 2000. 147 с.
10. Кірсанов С. О., Сагун А. В. Методичний підхід до розрахунку орієнтовної вартості розроблення програмного забезпечення. Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України № 1 (67). 2014. С. 163-171.
11. Потрап О. А., Кривоножко Г. Є. Методичні рекомендації щодо розрахунку трудомісткості розроблення програмного забезпечення на основі конструктивної моделі COCOMO II. Збірник наукових праць ЦНДІ ЗС України № 3 (102). 2022. С. 331-340.
12. Андон П. І. Методичні основи оцінювання витрат на розроблення та супровід прикладного програмного забезпечення комп'ютерних систем / П. І. Андон, П. П. Ігнатенко, І. П. Сініцин, О. О. Слабоспицька. Проблеми програмування. 2016. № 2-3 (спец. вип.). С. 264-273. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Progr_2016_2-3(spets).
13. COCOMO® II. Офіційний сайт Центру системної та програмної інженерії Університету Південної Каліфорнії. URL: http://csse.usc.edu/csse/.
14. Information technology – Software measurement – Functional size measurement – Part 1: Definition of concepts ISO/IEC 14143-1:2007. URL: https://www.iso.org/standard/38931.html
15. Корегін М. В., Чік М. Ю. Основи наукових досліджень. К: Алерта. 2020. 492 с.
16. Сурмін Ю.П. Майстерня вченого: підручник для науковця. К.: Навч. метод. центр "Консорціум з удосконалення менеджмент-освіти в України". 2006. 302 с.
17. Гусак Ю. А., Кірсанов С. О., Островський С. М. Математична модель автоматизованого управління військами в АСУВ типу C4ISR // Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence. 2021. № 1 (40). С. 47–54.
18. Перелік основних заходів досягнення цілей партнерства в Міністерстві оборони України та Збройних Сил України на 2021–2025 роки (в частині, що стосується цілей партнерства G 1000, L 1201, A 1201, M 1201, H 4005). NATO UNCLASSIFIED. 2021. 134 с.
19. Handbook "Operational capabilities concepte valuation and feedback (OCC E&F) programme" (Настанова з оцінювання сил та засобів, визначених для участі у Програмі оцінювання та зворотного зв'язку Концепції оперативних можливостей НАТО). OCC E&F Version 4.0. 2020. 164 с.

20. Allied Command Operations Forces Standards Volume VII – Стандарти Об'єднаних Сил НАТО, том VII – Оцінювання бойової готовності (Оцінювання Сухопутних військ)) (CREVAL). B-7010 SHAPE, BELGIUM. 2020. 262 с.
21. Комаров В. О. Про використання методу контролю частоти власних коливань при виборі методу відновлення авіаційної техніки // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: тези допов. на VII наук.-практ. конф. ЦНДІ ОВТ ЗС України. Київ: ЦНДІ ОВТ, 2019. С. 350–352.
22. Пат. 109226 Україна, МПК (2016) G 01 M 5/00, G 01 N 3/00. Спосіб визначення характеристик жорсткості крила літака неруйнівним методом в умовах експлуатації та ведення бойових дій / заявники і патентовласники Комаров В. О., Ткаченко В. А., Галушка В. І. № u 2016 02602; заявл. 16.03.16; опубл. 10.08.16. Бюл. № 15. 6 с.

References

1. Androsov V.A., Kutakhov V.P. Architecture of the hardware-integrated radio-electronic complex // Radiotekhnika. Moscow. 1996. № 9. P. 48-52.
2. Semenenko O. M. Analysis of existing methods of active radio-electronic counteraction to onboard stations of active interference of personal protection // SRIA. Kyiv. 2015 . № 11 (18). P. 120-129.
3. Semenenko O.M., Vodchyts O.H., Dobrovolskyi Y.B. Method of counter-radio-electronic counteraction to enemy aircraft interference station during the creation of polarization interference by it // Scientific and Technical Reports of the Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine. Kyiv. 2011. № 4 (58). P. 123-134.
4. Vasilevich L.F. Radioelectronic suppression. Kyiv: KVAIU, 1989. 243 p.
5. Semenenko O.M., Kablukov O.A., Myronenko V.S., Dobrovolskyi Y.B. Analysis of onboard stations of active interference of individual protection of enemy aircraft as possible objects of radio electronic counteraction // Scientific and Technical Report of the Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine. Kyiv. 2019. № 1 (87). P. 98-109.
6. Perunov Y.M., Matsukevich V.V., Vasiliev A.A. Foreign radioelectronic means / edited by Y.M. Perunov: in 4 books. Radar systems. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 336 p.
7. Semenenko O.M., Kablukov A.A., Chernega V.M. Ways to create an integrated radar and interference complex on fighter aircraft of the Armed Forces of Ukraine // Modern information technologies in the field of security and defence: scientific journal. Kyiv. 2019. № 2 (35). P. 43-48.
8. Semenenko O. M., Sorokin D. M., Dobrovolskyi Y. B., Kablukov O. A. Recommendations for the selection of a mathematical model for assessing the effectiveness of counter-radio-electronic counteraction to enemy airborne interference in air combat // Scientific and Technical Reports of the State Research Institute of Air Defence. Kyiv. 2019. № 15 (22). P. 181-188.
9. Vasilevich L.F. Game Theory. Kyiv: Nashe Delo, 2000. 147 p.
10. Kirsanov S. O., Sahun A. V. Methodical approach to calculating the estimated cost of software development. Collection of scientific papers of the Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine № 1 (67). 2014. P. 163-171.
11. Potrap O.A., Kryvonozhko H.E. Methodical recommendations for calculating the complexity of software development based on the COCOMO II constructive model. Collection of scientific papers of the Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine № 3 (102). 2022. P. 331-340.
12. Andon P.I. Methodical bases of estimation of costs for development and maintenance of application software of computer systems / P.I. Andon, P.P. Ignatenko, I.P. Sinitsyn, O.O. Slabospytska. Problems of programming. 2016. No. 2-3 (special issue). P. 264-273. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Progr_2016_2-3(spets).

13. COCOMO® II. Official website of the Center for Systems and Software Engineering at the University of Southern California. URL: http://csse.usc.edu/csse/.
14. Information technology - Software measurement - Functional size measurement - Part 1: Definition of concepts ISO/IEC 14143-1:2007. URL: https://www.iso.org/standard/38931.html.
15. Koregin MV, Chik MJ Fundamentals of scientific research. K: Alerta. 2020. 492 p.
16. Surmin Y.P. Scientist's Workshop: a textbook for a scientist. K.: Educational and Methodological Center "Consortium for the Improvement of Management Education in Ukraine". 2006. 302 p.
17. Gusak Y., Kirsanov S., Ostrovsky S. Mathematical model of automated troop management in the C4ISR type ACS // Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence. 2021. № 1 (40). P. 47-54.
18. List of key activities to achieve the partnership goals in the Ministry of Defence of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine for 2021-2025 (in the part related to the partnership goals G 1000, L 1201, A 1201, M 1201, H 4005). NATO UNCLASSIFIED. 2021. 134 p.
19. Handbook "Operational capabilities concept evaluation and feedback (OCC E&F) program" (Guidelines for the evaluation of capabilities identified for participation in the NATO Operational Capabilities Concept Evaluation and Feedback Program). OCC E&F Version 4.0. 2020. 164 p.
20. Allied Command Operations Forces Standards Volume VII - NATO Allied Command Standards Volume VII - Readiness Evaluation (Army Evaluation) (CREVAL). B-7010 SHAPE, BELGIUM. 2020. 262 p.
21. Komarov V.O. On the use of the method of controlling the frequency of natural oscillations when choosing a method of restoring aircraft // Prospects for the development of weapons and military equipment: abstracts of the VII Scientific and Practical Conference of the Research Institute of Aircraft and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine. Kyiv: Central Research Institute of Military Equipment, 2019. P. 350-352.
22. Pat. 109226 Ukraine, IPC (2016) G 01 M 5/00, G 01 N 3/00. Method for determining the stiffness characteristics of an aircraft wing by a non-destructive method in operation and combat / applicants and patentees Komarov V.O., Tkachenko V.A., Galushka V.I. No. u 2016 02602; application for 16.03.16; published 10.08.16. Bulletin No. 15. 6 p.

Mathematical model and algorithm for evaluating the effectiveness of the on-board weapon control radar stations in the conditions of obstacles and countering them in air combat

Serhii Ostrovskyi
candidate of military sciences,
head of the mathematical modeling research center
military and non-military measures
Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine
03049, Povitroflotskyi prospect, 28 B, Kyiv, Ukraine
e-mail: ostrovserg@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-4702-9808

Oleh Kablukov
PhD in Military Science
Leading researcher
Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine
28 B, Povitroflotskyi Avenue, Kyiv, Ukraine 03049
e-mail: okablukov@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8611-0849

Abstract. The development and practical implementation of new methods of active counteraction to enemy interference stations in air combat necessitate considering their impact on the overall efficiency of airborne radar weapons control stations, which requires improving existing mathematical models for describing their functioning in conditions of interference and simultaneous active counteraction. In the article, the author describes an improved mathematical model for assessing the effectiveness of airborne radar weapons control stations in air combat to ensure the survivability of a fighter aircraft and its reliable performance of a combat mission. The analysis of modern airborne radar systems and active interference stations as objects of mathematical modelling, methods of active counteraction to enemy airborne interference stations and existing mathematical models of the functioning of airborne radar weapons control stations is carried out. The initial data on the mathematical modelling of the functioning of airborne radar weapons control stations in conditions of interference with simultaneous counteraction to enemy interference stations are formed and the selected air combat situation is presented, which is subject to mathematical description. Indicators and criteria characterizing the effectiveness of the functioning of airborne weapons control radar stations have been selected, the main of which is the limitation on the range of their use depending on the method of counteraction used. Preliminary calculations have been made regarding the use of these methods of active counteraction. Considering the peculiarities of using methods of counteracting enemy stations, it is proposed to divide the cycle of air combat between aircraft into 5 stages depending on the distance between them. An algorithm for justifying the choice of methods of countering enemy interference stations, considering the range between aircraft for continuous target tracking, is developed and the probability of target tracking is determined, considering the use of various combinations of countermeasures. For a qualitative and complete assessment of the effectiveness of the functioning of airborne radar weapons control stations, it is proposed to use fuzzy sets and game theory, which are used to build a mathematical model for assessing the effectiveness of airborne radar weapons control stations in terms of countering enemy interference stations, which was used to develop an algorithm and select the most effective combination of countermeasures.

Keywords: efficiency of functioning, weapon control, mathematical modelling, interference station.