

## УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ БОРТОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ УПРАВЛІННЯ ЗБРОЄЮ В УМОВАХ АКТИВНОЇ ПРОТИДІЇ СТАНЦІЯМ ПЕРЕШКОД ПРОТИВНИКА

*У статті описано удосконалений метод математичного моделювання функціонування бортових радіолокаційних станцій в умовах активної протидії станціям перешкод противника.*

*Проведено аналіз сучасних бортових радіолокаційних систем та станцій активних перешкод як об'єктів математичного моделювання, а також існуючих способів активної протидії бортовим станціям перешкод противника та методів математичного моделювання функціонування бортових радіолокаційних станцій.*

*Сформовані вихідні дані щодо моделювання функціонування бортових радіолокаційних станцій в умовах перешкод та активної протидії станціям перешкод противника, наведено визначену ситуацію повітряного бою, яка підлягає математичного опису.*

*Було обрано показники та критерії, які характеризують ефективність функціонування бортових радіолокаційних станцій основним з яких є обмеження по дальності їх використання в залежності від способу протидії, що застосовується. Проведені попередні розрахунки щодо застосування зазначених способів активної протидії. Враховуючи особливості застосування способів активної протидії станціям перешкод противника, запропоновано поділити цикл повітряного бою між літаками на 5 етапів в залежності від дальності між ними.*

*Розроблено алгоритм обґрунтування вибору способів протидії станціям перешкод противника з урахуванням дальності 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 запропоновано використовувати нечіткі множини та теорію ігор, за допомогою чого побудована математична модель оцінювання ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій в умовах протидії станціям перешкод противника, яка застосовувалась також під час розроблення алгоритму та вибору найефективнішої комбінації способів протидії.*

*Ключові слова: методи математичного моделювання, алгоритм, модель, станція активних перешкод індивідуального захисту, бортова радіолокаційна станція управління зброєю, способи контррадіоелектронної протидії.*

**Вступ та постановка задачі.** Досвід локальних війн і конфліктів показує, що авіація без засобів радіоелектронної боротьби має дуже низьку живучість. Застосування станцій активних перешкод індивідуального захисту літаків доводить ймовірність неураження літака в повітряному бою до 0,45–0,75, а комплексне застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) дозволяє довести цю ймовірність до 0,8–0,95. Таким чином в зв'язку з важливістю завдань виконуваних бортовими засобами РЕБ та їх ефективністю останнім часом все більше активно стали досліджуватися питання радіоелектронної протидії самим засобам РЕБ так звана контррадіоелектронна протидія (КРЕП) [1-4].

Сьогодні для протидії станціям активних перешкод індивідуального захисту (САП ІЗ) є ряд способів протидії їм, використання яких має випадковий характер. Проте проведений аналіз їх застосування свідчить, що більшість способів активної протидії мають різні умови їх застосування, які пов'язані із змінами роботи бортової радіолокаційної станції (БРЛС), що накладає на них обмеження по дальності їх використання.

Розвиток та практична реалізація нових способів активної протидії станціям перешкод противника в повітряному бою створює умови щодо необхідності урахування їх впливу на загальну ефективність функціонування БРЛС управління зброєю, що в свою чергу, викликає

необхідність удосконалення існуючих методів опису функціонування БРЛС управління зброєю (БРЛ УЗ) в умовах перешкод та одночасної протидії їм.

Тому подальший розвиток способів радіоелектронної протидії САП ІЗ противника створює необхідність удосконалення математичних моделей опису функціонування БРЛС в повітряному бою як в умовах перешкод так і одночасної протидії їм з метою формування чітко визначеного алгоритму застосування розроблених та практично реалізованих на борту способів протидії.

Вирішення цього наукового завдання можливе в удосконаленні існуючих методів математичного моделювання функціонування БРЛС УЗ. Тому метою статті є розроблення удосконаленого методу математичного моделювання функціонування БРЛС УЗ в умовах активної протидії станціям перешкод противника у повітряному бою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз останніх досягнень і публікацій [1–13] з тематики, що розглядалась, показує, що переважна більшість математичних моделей, які описують процеси взаємодії засобів РЕБ та радіолокації, призначені для оцінювання ефективності функціонування бортових радіолокаційних станцій в умовах перешкод [1, 3, 4].

Роботи [2, 5] присвячені способам активної протидії КРЕП, які мають різні умови їх застосування та пов'язані із змінами роботи БРЛС, що накладає на них обмеження по дальності їх використання.

Окремими випадками є моделі, які дозволяють оцінювати ефективність застосування тих чи інших пасивних засобів захисту бортової радіолокаційної станції від окремих видів перешкод [9, 10].

У роботі [12] автори зазначають, що процес протистояння в повітряному бою БРЛС УЗ та САП ІЗ протікає в умовах стохастичної невизначеності прешкодової обстановки в силу відсутності повної інформації про ведення КРЕП, про характеристики САП ІЗ противника, невідомих умов ведення повітряного бою, відсутності практичних оцінок перешкодозахищеності БРЛС при веденні КРЕП на певних етапах бою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Математичний опис застосування удосконаленого методу математичного моделювання функціонування БРЛС УЗ поділено на п'ять етапів. Структурно-логічна схема удосконаленого методу складається з п'яти етапів.

На першому етапі (рис. 1) сформовані вихідні дані щодо моделювання функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод та протидії САП ІЗ противника, основні з яких: потужність передавачів БРЛС та САП ІЗ; коефіцієнти підсилення антен БРЛС та САП ІЗ; коефіцієнт подавлення БРЛС; потужність перешкоди та сигналу на вході антени; кут зміни площини поляризації перешкоди при прийомі від ортогонального положення; дальність від винищувача до цілі.

У блоці 1.1 (рис. 1) наведена ситуація повітряного бою, яка підлягає математичного опису та розкриті напрями КРЕП. У блоці 1.2 (рис. 1) наведено у загальному вигляді алгоритм застосування способів протидії станціям активних перешкод індивідуального захисту противника з урахуванням етапів повітряного бою та режимів пеленгації.

Слід зазначити, що під час опису протидії станціям перешкод противника використовується чотири способи КРЕП: 1 та 2 способи – Здійснення протидії станції активних перешкод противника шляхом зміни поляризації сигналу на прийомі БРЛС УЗ; 3-ій спосіб – Здійснення протидії станції активних перешкод противника шляхом зміни потужності опромінюючого сигналу БРЛС УЗ; 4-ий спосіб – Здійснення протидії станції активних перешкод противника шляхом порушення регулярності опромінення.

На другому етапі (рис. 2) обрано показники та критерії, які характеризують ефективність функціонування бортових радіолокаційних станцій управління зброєю. У блоці 2.1 (рис. 2) визначено показники функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод без урахування протидії, а у блоці 2.3 (рис. 2) – в умовах перешкод та протидії їм, а саме: дальність виявлення цілі; дальність застосування режиму безперервної пеленгації; відношення сигнал / шум на вході

приймача БРЛС УЗ; потужність корисного сигналу на вході приймача БРЛС УЗ; коефіцієнт подавлення БРЛС.

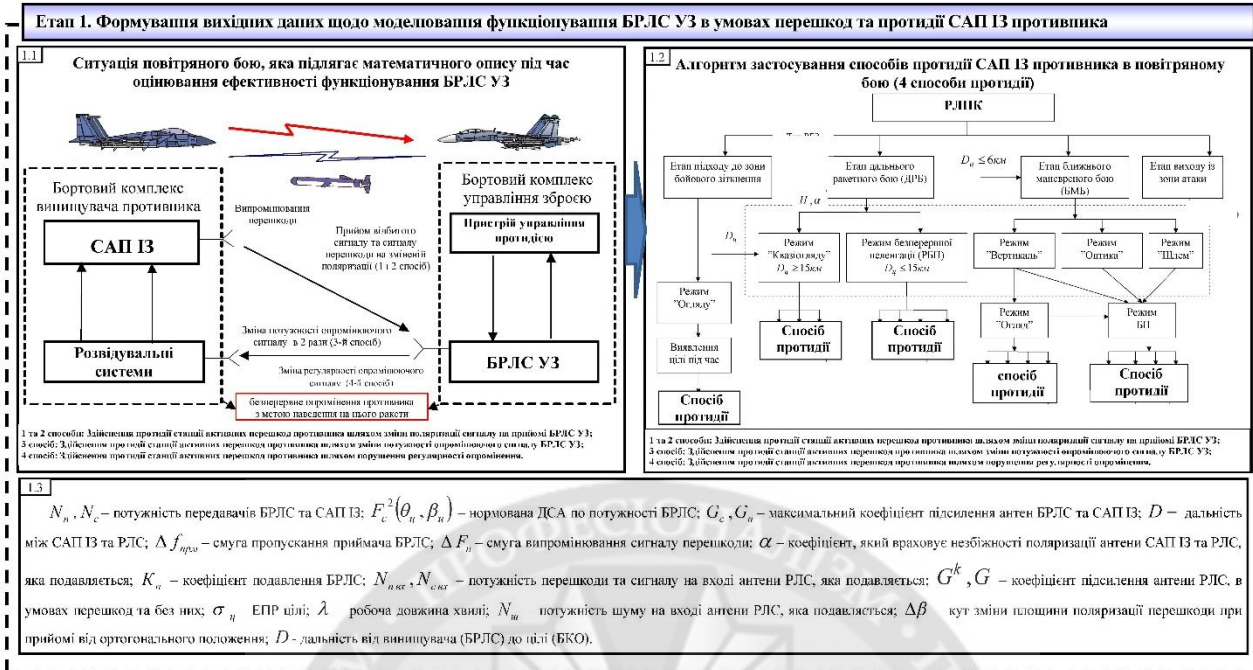


Рисунок 1 – Удосконалений метод етап 1

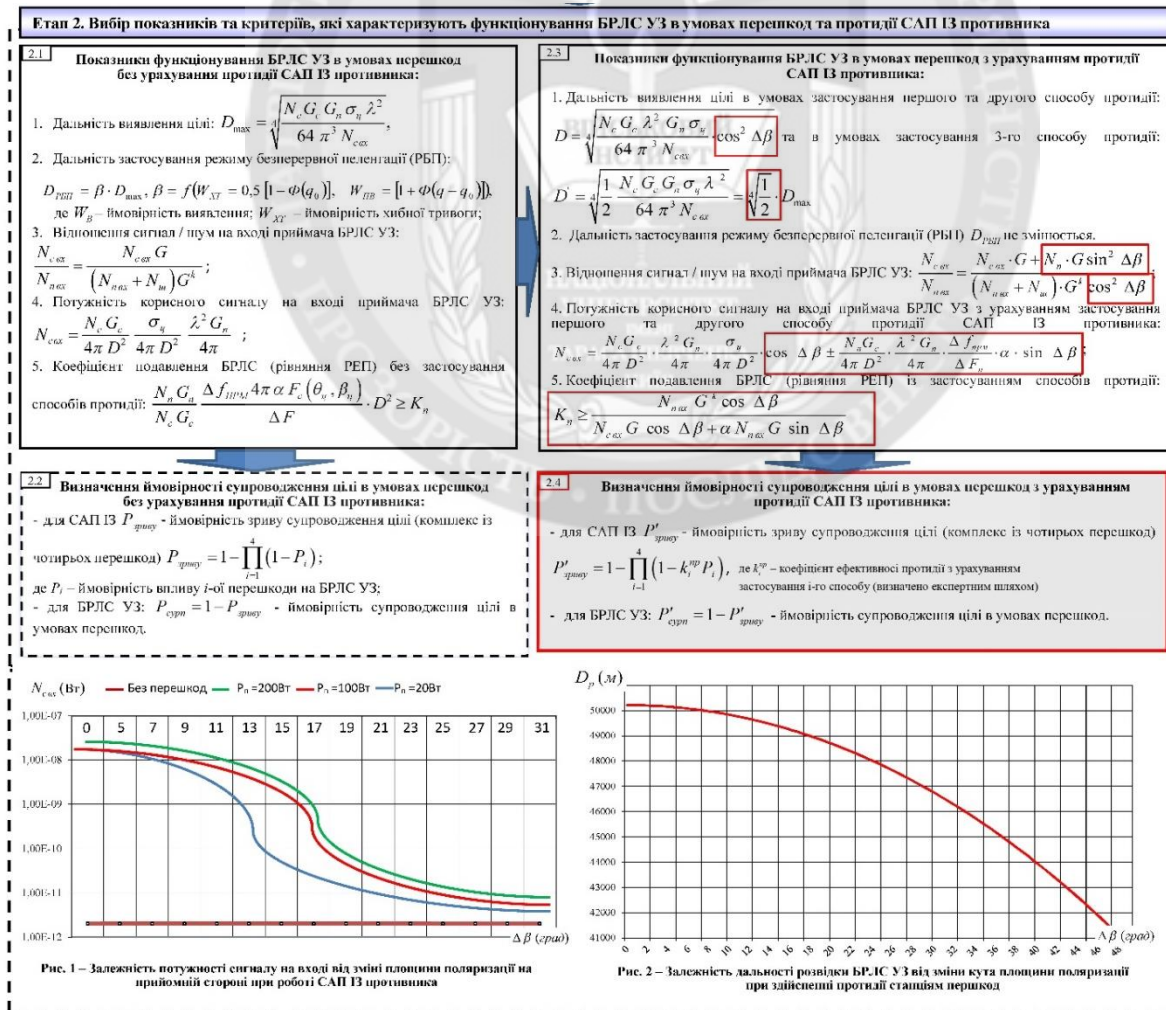


Рисунок 2 – Удосконалений метод етапи 2

Також розраховано обмеження щодо застосування обраних способів активної протидії, основним критерієм обмеження є дальність їх використання за формулами (1) та (2) в залежності від способу КРЕП, який застосовується.

$$D = \sqrt[4]{\frac{N_c G_c \lambda^2 G_n \sigma_u}{64 \pi^3 N_{c\text{ex}}} \cdot \cos^2 \Delta\beta}, \quad (1)$$

$$D' = \sqrt[4]{\frac{1}{2} \frac{N_c G_c G_n \sigma_u \lambda^2}{64 \pi^3 N_{c\text{ex}}} = \sqrt[4]{\frac{1}{2}} \cdot D_{\text{max}}}. \quad (2)$$

де  $N_c$  ( $N_{c\text{ex}}$ ) – потужність сигналу передавача та сигналу на вході антени,  $G_c$  ( $G_n$ ) – максимальний коефіцієнт підсилення антен БРЛС та САП ІЗ,  $\lambda$  – робоча довжина хвилі,  $\sigma_u$  – ефективна площа розсіювання цілі,  $\Delta\beta$  – кут зміни площини поляризації.

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

Критерієм ефективності функціонування БРЛС в умовах перешкод та одночасної протидії їм обрано ймовірність супроводження цілі, тому у блоках 2.2 та 2.4 (рис. 2) визначено ймовірності супроводження цілі в умовах перешкод з урахуванням протидії та без неї, де додатково застосовано коефіцієнт ефективності протидії.

Далі відповідно проведених розрахунків для прикладу графічно наведені залежність потужності сигналу на вході від зміни площини поляризації на прийомній стороні при роботі САП ІЗ противника та залежність дальності розвідки БРЛС УЗ від зміни кута площини поляризації при здійсненні протидії станціям перешкод.

На третьому етапі (рис. 3) розроблено Алгоритм обґрунтування вибору способів протидії станціям перешкод противника з урахуванням дальності до цілі та відповідній комбінації способів протидії для безперервного супроводження цілі.

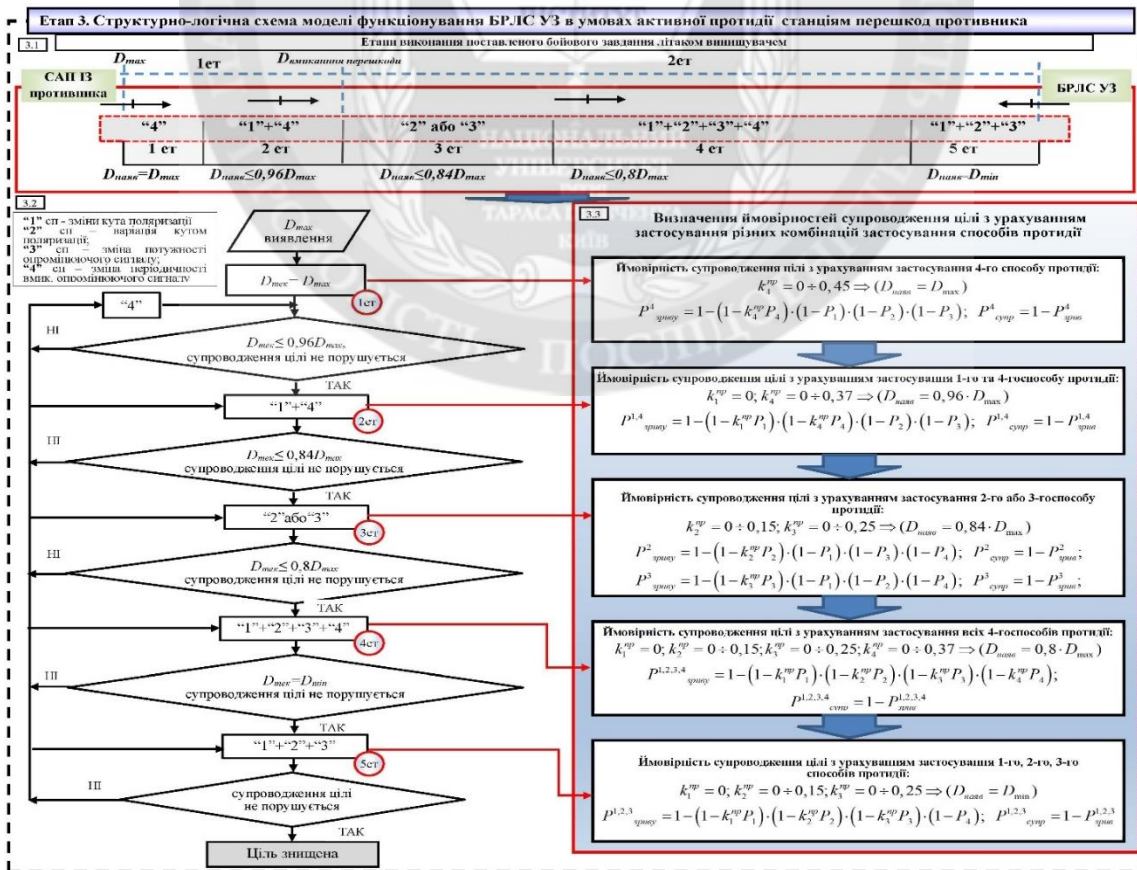


Рисунок 3 – Удосконалений метод етап 3

Розроблення алгоритму передбачало необхідність перегляду послідовності ведення повітряного бою із урахуванням особливостей застосування запропонованих способів радіоелектронної протидії станціям перешкод противника

У блоці 3.1 (рис. 3) запропоновано поділити етапи виконання поставленого бойового завдання літаком винищувачем на 5 етапів в залежності від дальності до цілі (розрахованих вище) на відміну від існуючих етапів на сьогодні.

У блоці 3.3 (рис. 3) визначаються ймовірності супроводження цілі з урахуванням застосування різних комбінацій способів протидії з урахуванням відповідних коефіцієнтів протидії.

Розроблений алгоритм удосконалює існуючий підхід функціонування бортової РЛС УЗ за показником ймовірності супроводження цілі в умовах застосування запропонованих способів протидії станціям перешкод враховуючи обмеження їх застосування.

На етапі 4 (рис. 4) проведено оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах протидії станціям перешкод противника та без протидії

У блоці 4.1 (рис. 4) відбувається формування нечітких оцінок ймовірності супроводження БРЛС УЗ в умовах перешкод та протидії САП ІЗ противника у разі застосування усіх способів протидії.

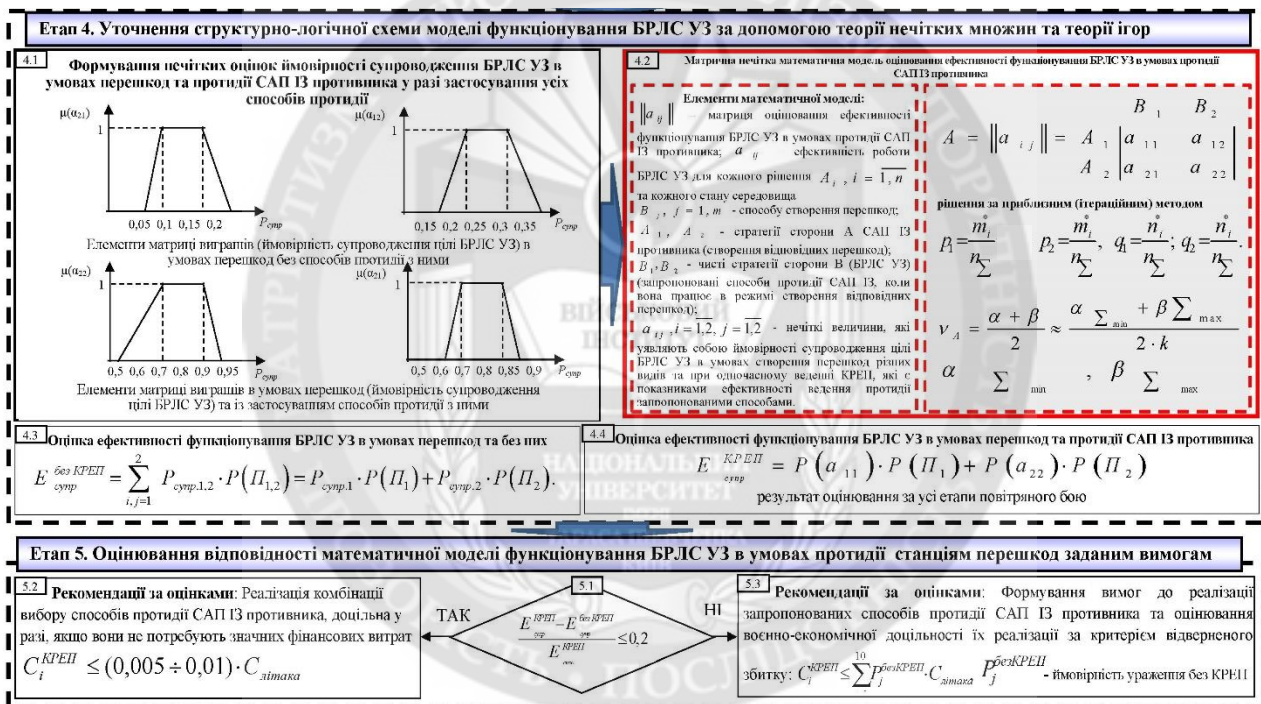


Рисунок 4 – Удосконалений метод етапи 4 – 5

Застосування нечітких шкал оцінювання викликано фактором відсутності чітких оцінок ефективності застосування різних видів перешкод та способів протидії їм, а також природною невизначеністю повітряного бою. У повітряному бою можливі 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 та 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.

У блоці 4.2 (рис. 4) наведена математична модель оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах протидії САП ІЗ противника, яка застосовувалась під час розроблення алгоритму та вибору найефективнішої комбінації способів протидії. Було запропоновано математичну модель опису оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод та одночасної протидії станції активних перешкод противника

представити у вигляді нечіткої матричної гри. На нашу думку ця модель є найбільш адекватною для описання такої ситуації щодо БРЛС УЗ літака-винищувача та САП ІЗ противника в умовах здійснення їх активної протидії. Ця математична модель дозволить оцінити ефективність роботи БРЛС УЗ в умовах перешкод та одночасної протидії їм. Запропонована модель 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 застосування способів протидії САП ІЗ противника є оцінки ефективності БРЛС УЗ на визначених етапах ведення повітряного бою за різних умов застосування БРЛС УЗ, як в умовах перешкод так і в умовах одночасної протидії їм. Загальна оцінка за різного стану середовища повітряного бою розраховується за формулою повної ймовірності розраховано оцінка ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод без протидії САП ІЗ противника та з урахуванням протидії цим станціям (блоки: 4.3 та 4.4. (рис. 4)).

На п'ятому етапі (рис. 4) проведено оцінювання відповідності удосконаленого методу математичного моделювання заданим вимогам щодо доцільності реалізації запропонованих способів протидії САП ІЗ противника за критерієм воєнно-економічної доцільності та критерієм відверненого збитку.

**Висновки.** Таким чином удосконалений метод дозволить здійснити обґрунтований опис оцінювання ефективності функціонування БРЛС УЗ в умовах перешкод та одночасної активної протидії станціям перешкод противника, що дозволить за попередніми (рис. 4) розрахунками підвищити ефективність функціонування БРЛС УЗ на 14–33 відсотка, а також врахувати невизначеність ситуації, яка складається під час ведення повітряного бою.

Розроблений алгоритм удосконалює існуючий підхід функціонування бортової РЛС УЗ за показником ймовірності супроводження цілі в умовах застосування запропонованих способів протидії станціям перешкод враховуючи обмеження їх застосування.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на надання рекомендацій до впровадження удосконаленого методу під час модернізації винищувачів Повітряних Сил Збройних Сил України з урахуванням різних видів перешкод та появи нових способів протидії.

#### REFERENCES:

1. Androsov V.A., Kutakhov V.P. Architecture hardware integrovaneho electronic complex // technology, 1996. №. 9. P. 48-52.
2. Semenenko O.M. Analysis of existing methods of active electronic counteraction to onboard stations of active obstacles of individual protection. DNDIA. Kyiv: 2015. №11 (18). P. 120–129.
3. Perunov, Y.M., Matsukevitch V.V., Vasiliev A.A. Foreign electronic warfare / ed. by Perunova Y.M.: 4 kN. KN. 1. The radar system. Moscow: Radio Engineering, 2010. 336 p.
4. Fighter-bomber, the Jaguar. Systems and equipment: [Electron. resource]. – Mode of access: <http://aviac.ru/fighters/8-mnogocelevoj-istrebiteel-mirazh-f-i.html>.
5. Semenenko O.M., Vodchyts O.G., Dobrovolsky Y.B. Method of counterradioelectronic counteraction to the aircraft station of enemy obstacles during its creation of the induced polarization obstacle / ZNP Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine. Kyiv: 2011. №4 (58). P.123–134.
6. Vasilevich L. F. radio-Electronic suppression. Kyiv: KWAI, 1989. 243 p.
7. Multirole fighter Mirage F-I: [Electron. resource]. – Mode of access: <http://aviac.ru/fighters/8-mnogocelevoj-istrebiteel-mirazh-f-i.html>.
8. Lockheed-Boeing-General Dynamics F-22 Raptor, Multirole fighter: [Electron. resource]. – Mode of access: <http://www.paralay.com/f22.html>.
9. Semenenko O.M., Kablukov O.A., Dobrovolsky Y.B. Analysis of onboard stations of active obstacles of individual protection of enemy aircraft as possible objects of electronic counteraction // Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine. Kyiv: 2019. № 1 (87). P. 98–109.

10. Semenenko OM, Kablukov OA, Chernega VM Ways to create an integrated radar interference system on fighter jets of the Armed Forces of Ukraine. Scientific journal: "Modern Information Technologies in the Field of Security and Defense" №2 (35). Kyiv: 2019. P. 43–48.

11. Handbook of methods of jamming and anti-jamming systems, radar control. Volume 2. Chapter 5. Encyclopedia of anti-jamming methods and techniques of their application. ed Latkina Y. S. – Moscow: vvia im. Zhukovsky, 1987. 620 p.

12. Semenenko O.M., Sorokin D.M., Dobrovolsky Y.B., Kablukov O.A. Recommendations for choosing a mathematical model for evaluating the effectiveness of counterradioelectronic counteraction to the onboard station of enemy interference in air combat. ZNP DNDIA №15 (22). Kyiv: 2019. P. 181–188.

13. Vasilevich L. F. game Theory – Kiev: Our right, 2000. 147 p.

**д.воен.н., с.н.с. Семененко О.М., Каблуков О.А., к.т.н., с.н.с. Красник А.В.**  
**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**  
**ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ**  
**ОРУЖИЕМ В УСЛОВИЯХ АКТИВНОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЯМ ПОМЕХ**  
**ПРОТИВНИКА**

*В статье описан усовершенствованный метод математического моделирования функционирования бортовых радиолокационных станций в условиях активного противодействия станциям помех противника.*

*Проведен анализ современных бортовых радиолокационных систем и станций активных помех как объектов математического моделирования, а также существующих способов активного противодействия бортовым станциям помех противника и методов математического моделирования функционирования бортовых радиолокационных станций.*

*Сформированы исходные данные по моделированию функционирования бортовых радиолокационных станций в условиях помех и активного противодействия станциям помех противника, приведена выбранная ситуация воздушного боя, которая подлежит математическому описанию.*

*Были выбраны показатели и критерии, характеризующие эффективность функционирования бортовых радиолокационных станций, основным из которых является ограничение по дальности их использования в зависимости от применяемого способа противодействия. Проведены предварительные расчеты относительно применения указанных способов активного противодействия. Учитывая особенности применения способов активного противодействия станциям помех противника, предложено поделить цикл воздушного боя между самолетами на 5 этапов в зависимости от дальности между ними.*

*Разработан алгоритм обоснования выбора способов противодействия станциям помех противника с учетом дальности между самолетами для непрерывного сопровождения цели и определены вероятности сопровождения цели с учетом применения различных комбинаций способов противодействия.*

*Для качественной и полной оценки эффективности функционирования бортовых радиолокационных станций предложено использовать нечеткие множества и теорию игр, с помощью чего построена математическая модель оценки эффективности функционирования бортовых радиолокационных станций в условиях активного противодействия станциям помех противника, которая применялась во время разработки алгоритма и выбора самой эффективной комбинации способов противодействия.*

*Ключевые слова: методы математического моделирования, алгоритм, модель, станция активных помех индивидуальной защиты, бортовая радиолокационная станция управления оружием, способы контррадиоэлектронного противодействия.*

Doctor of Military Sciences Semenenko O.M.,  
Kablukov O.A., Ph.D. Krasnik A.V.

**AN IMPROVED METHOD FOR MATHEMATICAL MODELING OF THE FUNCTIONING OF  
AIRBORNE RADAR WEAPON CONTROL STATIONS IN THE FACE OF ACTIVE OPPOSITION  
TO ENEMY INTERFERENCE STATIONS**

*The article describes an improved method for mathematical modeling of the functioning of the onboard radar in conditions of active opposition to the jammers of the enemy.*

*The analysis of modern airborne radar systems and stations of active hindrances as objects of mathematical modeling, and existing methods of active resistance to the on-Board jammers of the enemy and methods of mathematical modeling of the functioning of the onboard radar.*

*Generated input data for the modeling of the performance of airborne radars in noisy environments and active opposition to the jammers of the enemy, given a selected situation of air combat, which is subject to mathematical description.*

*Were the selected indicators and criteria, characterizing efficiency of functioning of the onboard radar, the main of which is the restriction on the range of their use, depending on the applied method of resistance. Preliminary calculations regarding the application of these methods is active opposition. Given the peculiarities of application of active methods of combating enemy jamming stations, it is proposed to divide the cycle of air combat between aircraft on 5 stages, depending on the distance between them.*

*The algorithm justify the selection of methods of countering enemy jamming stations taking into account the distance between the aircraft for continuous tracking and determined the probability of target tracking with the use of different combinations of ways of counteraction.*

*For proper and complete evaluation of the performance of airborne radars is proposed to use fuzzy sets and the theory of games, by means of what a mathematical model of evaluating the performance of airborne radars in the conditions of active opposition to the jammers of the enemy, which was used during development of the algorithm and selecting the most efficient combination of ways to counter.*

*Keywords: mathematical modeling, algorithm, model, jammer for personal protection, airborne radar weapons control, methods contrarian counter.*

