

*Шовкошитний Ігор Іванович (кандидат військових наук, старший науковий співробітник)*

*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ НА ОСНОВІ ЙМОВІРНІСНОГО ПІДХОДУ

Однією з тенденцій російсько-української війни є зростання уваги до розвитку та впровадження новітніх багатofункціональних безпілотних систем і засобів (комплексів) радіоелектронної боротьби для протидії безпілотним літальним апаратам. Бойове застосування таких систем неможливе без оцінювання ефективності процесів, які відбуваються в умовах конфліктної взаємодії сил і засобів радіоелектронної боротьби та безпілотних літальних апаратів противника. Таке оцінювання потрібне не лише для вибору дієвих технічних рішень під час розроблення конкретних зразків озброєння, а й для синтезу локальних і просторово-розподілених систем радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами, формування яких в Україні наразі лише триває. Інструментом оцінювання є математичні моделі, які повинні мати розумний баланс між достатньою точністю, повнотою відображення властивостей систем (об'єктів) та простотою їх моделювання. Такі властивості мають ймовірнісні моделі, які доволі часто застосовуються у військовій галузі. З урахуванням цього, стаття присвячена вирішенню актуального наукового завдання, яке полягає у висвітленні математичної моделі оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами на основі ймовірнісного підходу. Під час проведення дослідження застосовано положення системного підходу, методи теорії ймовірності, моделювання систем, елементи теорії виявлення сигналів та методи теорії кваліметрії. Поєднання таких методів дало змогу системно підійти до формування структури моделі, опису функціонування підсистеми виявлення безпілотних літальних апаратів та підсистеми подавлення їх бортових систем. За результатами проведеного дослідження узагальнено аналіз публікацій з подібної тематики, здійснено опис процесів, які відбуваються в конфлікті «система радіоелектронної боротьби – безпілотні літальні апарати противника», сформовано базові правила, які використовуються у математичній моделі під час складання повних груп подій (процесів виявлення та подавлення), розроблена блок-схема математичної моделі, яка дозволяє визначати кількісні значення часткових та загальних показників ефективності (відповідно – ймовірності виявлення безпілотних літальних апаратів, подавлення їх бортових систем та ймовірності зриву виконання завдань безпілотними літальними апаратами в межах простору відповідальності системи радіоелектронної боротьби). Крім того, у моделі передбачена можливість лінгвістичної інтерпретації отриманих ймовірностей за допомогою психофізичних шкал оцінок. Наукова новизна полягає у комплексному врахуванні у запропонованій математичній моделі типових ймовірнісних процесів виявлення безпілотних літальних апаратів (засобами радіолокаційної, радіотехнічної та оптичної розвідки) та подавлення їх бортових радіоелектронних систем (навігації, управління та телеметрії, оптико-електронних засобів), поєднанні відносно простих аналітичних, ймовірнісних та кваліметричних моделей (методів) для отримання оцінок ефективності складної просторово-розподіленої системи за невеликого обсягу ввідних даних. Практична значущість отриманих результатів дослідження для воєнно-оборонної сфери полягає в можливості оперативно оцінювати системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами за допомогою розробленої логічно зрозумілої математичної моделі з отриманням чисельних значень показника ефективності та їх інтерпретації у лінгвістичному вигляді, що є зручним у процесі оцінювання, порівняння або синтезу перспективних варіантів подібних систем.

**Ключові слова:** математична модель, оцінювання ефективності, система радіоелектронної боротьби, боротьба з безпілотними літальними апаратами, ймовірність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** В сучасному світі триває трансформація поглядів на ведення збройної боротьби, чому, зокрема, сприяє російсько-українська війна, яка вже всім світом сприймається як війна ресурсів і технологій. У [1]

зазначено, що досвід ведення бойових дій Збройними Силами України, особливо в 2022–2023 роках є унікальним. Саме у цей період значно зросла актуальність безпілотних систем та систем радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) з

безпілотним літальним апаратам (далі – БпЛА). Виявилось, що саме ці високотехнологічні системи здатні вирішувати низку ключових проблем в організації і веденні бойових дій Силами оборони України. Вони безпосередньо впливають на ефективність військ за рахунок підвищення ступеня безконтактності ведення бойових дій та зменшення втрат за рахунок їх дистанційного застосування. Зазначені тенденції враховуються і противником, який останнім часом надає значної уваги розвитку та впровадженню як новітніх багатофункціональних безпілотних систем, так засобів (комплексів) РЕБ для протидії нашим БпЛА. У цих умовах виникає потреба оцінювання ефективності процесів, які відбуваються в конфліктній системі «система РЕБ – БпЛА противника».

Результати оцінювання потрібні не лише для вибору найдієвіших технічних рішень під час розроблення конкретних зразків техніки РЕБ, а й для розроблення основ синтезу сучасних локальних і просторово-розподілених систем РЕБ з БпЛА, формування яких в Україні наразі лише триває. Отже, оцінювання ефективності систем РЕБ з БпЛА, згідно із положеннями теорії систем, є складним процесом, який потребує вирішення актуального наукового завдання щодо розроблення відповідних математичних моделей (далі – ММ). Ці моделі мають забезпечувати розумний баланс між достатньою точністю, повнотою відображення властивостей об'єктів та простотою їх моделювання. У багатьох випадках таким вимогам, за умов адекватної формалізації конкретної задачі, відповідають саме ймовірнісні моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Судячи з аналізу фахових джерел, моделювання функціонування систем РЕБ є комплексною проблемою і охоплює переважно питання моделювання перешкодових сигналів [2; 3], структури засобів РЕБ, їх окремих структурних або функціональних складових, процесів їх функціонування тощо. Проте моделювання систем РЕБ з БпЛА, яка згідно із положеннями теорії систем є складною, являє собою доволі непросте завдання, що передбачає синтез функціональних, організаційних структур систем (підсистем) різного цільового призначення, опис процесів їх бойового застосування, оцінювання ефективності тощо.

В описових моделях РЕБ для оцінювання потенційної перешкодової обстановки частіше використовуються базові аналітичні моделі розрахунку зон подавлення [2], математичні вирази і моделі, відомі з теорії радіозв'язку, теорії електродинаміки та поширення радіохвиль [4–6], а також теорії ймовірності. Зазначені аналітичні ММ дають змогу розраховувати типові енергетичні й тактичні показники, які характеризують вплив радіоперешкод на певні радіоелектронні системи і засоби. Проте використання таких ММ потребує значної кількості вихідних даних технічного

характеру. Водночас, окремі ММ [5; 7] детально описують вплив радіоперешкод лише на окремі засоби, що можуть використовуватись у складі бортового обладнання БпЛА.

У [8] для оцінювання ефективності запропоновано низку аналітико-ймовірнісних моделей на основі низки оперативного-тактичних критеріїв (імовірність виконання бойового завдання в умовах РЕБ, коефіцієнт ефективності функціонування системи РЕБ, коефіцієнт ефективності способу РЕБ тощо) та критерія інформаційного збитку (співвідношення умовних ентропій корисного сигналу і перешкоди). Для оцінювання якості радіоперешкод введено узагальнену ММ багатомірної ентропії, яка оперує низкою специфічних показників (міра невизначеності випадкового процесу (перешкоди), ентропійна потужність, коефіцієнт якості шумових перешкод тощо), що робить модель доволі абстрактною.

У [9; 10] наведена ММ комплексної системи виявлення та впливу на БпЛА противника, у якій для опису функціонування підсистем виявлення та впливу застосовано моделі систем масового обслуговування з каналами різної продуктивності. Проте у зазначеній ММ простежується явна суперечність між реальними процесами, що відбуваються в конфліктній системі «різномірні засоби виявлення (протидії) – складний об'єкт протидії» та математичною інтерпретацією самої моделі, у якій засоби РЕБ та БпЛА розглянуто у спрощеному вигляді для забезпечення можливості застосування положень теорії систем масового обслуговування.

Отже очевидно, що єдиної математичної моделі, яка б комплексно описувала усі аспекти функціонування системи РЕБ з БпЛА, зокрема й оцінювання її ефективності, нині немає. Зазначене пояснюється тим, що з організаційного погляду така система ще знаходиться у процесі формування, хоча з функціонального – елементи такої системи активно застосовуються у російсько-українській війні.

**Мета статті.** З урахуванням зазначеного, метою статті є висвітлення математичної моделі оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами на основі ймовірнісного підходу.

### Виклад основного матеріалу дослідження

У математичній моделі, блок-схема якої наведена на рис. 1 ступінь (повнота) виконання завдань системою РЕБ з БпЛА оцінюється на підставі ймовірнісного підходу з отриманням кількісного значення показника ефективності – ймовірності зриву (або надійного зриву) виконання завдань БпЛА в межах простору відповідальності системи РЕБ) та її лінгвістичної інтерпретації за допомогою психофізичних шкал оцінок.

У моделі припускається, що процеси (події) виявлення БпЛА та подавлення їх бортових систем є сумісними та незалежними (події можуть відбутися одночасно і поява однієї з них не змінює ймовірності появи іншої). Тому показник

ефективності ( $E_{рп}$ ) може бути визначений на підставі теореми щодо добутку ймовірностей двох незалежних подій [9; 10], якими є «виявлення» та «подавлення».

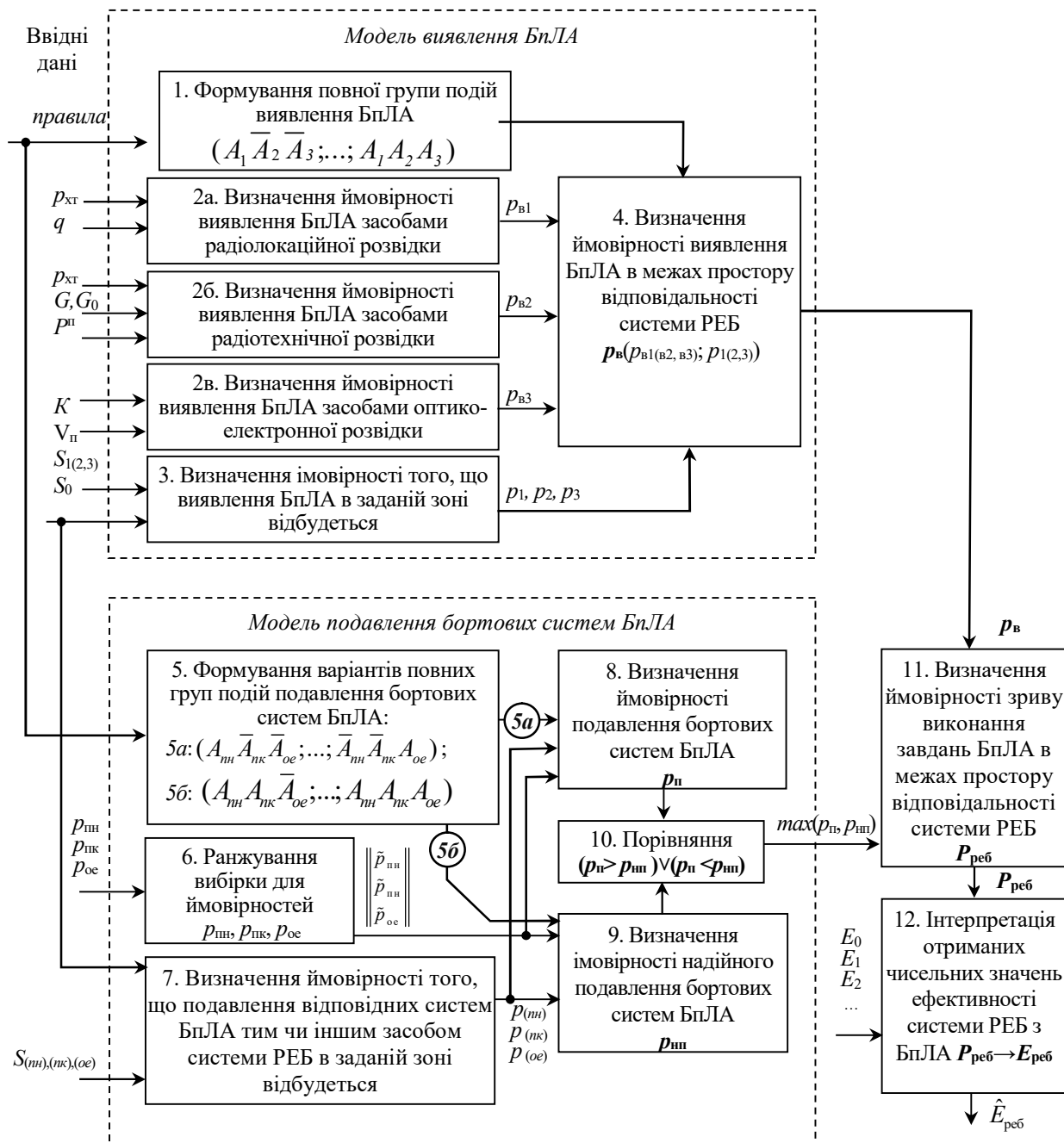


Рисунок 1 – Блок-схема математичної моделі оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами на основі ймовірнісного підходу

Відповідно до цього у блок-схемі ММ розглядаються дві часткові моделі, що відповідно описують виявлення БпЛА та подавлення їх бортових систем відповідними засобами системи РЕБ з БпЛА. Відповідно до опису процесів, які відбуваються в конфлікті «система РЕБ – БпЛА противника» [9], математична модель базується на низці базових правил, що використовуються під

час складання повних груп подій (процесів виявлення та подавлення).

Правило перше, яке враховується у частковій моделі виявлення БпЛА під час формування повної групи подій виявлення: *БпЛА противника вважається виявленим* в межах простору відповідальності системи РЕБ у разі виявлення його хоча б одним із засобів підсистеми розвідки –

радіолокаційної (подія  $A_1$ ), радіотехнічної (подія  $A_2$ ) або оптико-електронної (подія  $A_3$ ).

Правила, які враховуються у частковій моделі подавлення бортових систем БпЛА:

правило друге – *зрив (порушення) виконання завдань БпЛА* в межах простору відповідальності системи РЕБ можливий у разі подавлення однієї з основних бортових систем – навігаційних приймачів (подія  $A_{\text{пн}}$ ), приймачів командно-телеметричної радіолінії зв'язку (подія  $A_{\text{тк}}$ ), оптико-електронних засобів (далі – ОЕЗ) (подія  $A_{\text{ое}}$ );

правило третє – *надійний зрив виконання завдань БпЛА* в межах простору відповідальності системи РЕБ забезпечується за умови подавлення не менше двох із трьох основних бортових систем БпЛА.

Розглянемо сутність та взаємозв'язок часткових моделей виявлення БпЛА та подавлення їх бортових систем. У моделі виявлення БпЛА на підставі першого правила формується повна група подій «виявлення БпЛА» (блок 1), яка відповідно до обраної логіки має вигляд:

$$\begin{aligned} & (A_1 \bar{A}_2 \bar{A}_3; \bar{A}_1 A_2 \bar{A}_3; \bar{A}_1 \bar{A}_2 A_3; \\ & A_1 A_2 \bar{A}_3; A_1 \bar{A}_2 A_3; \bar{A}_1 A_2 A_3; A_1 A_2 A_3). \end{aligned} \quad (1)$$

У блоках 2а–2в визначаються ймовірності виявлення БпЛА відповідними засобами підсистеми розвідки ( $p_{\text{в1}}$  – ймовірності виявлення БпЛА засобами радіолокаційної розвідки,  $p_{\text{в2}}$  – радіотехнічної,  $p_{\text{в3}}$  – оптико-електронної). Для оперативних розрахунків, зазвичай, значення ймовірностей виявлення ( $p_{\text{в1}}$ ,  $p_{\text{в2}}$ ,  $p_{\text{в3}}$ ) можуть обиратись на підставі відомих тактико-технічних характеристик типових засобів розвідки або на підставі їх усереднених характеристик, які становлять  $p^* \approx 0,6-0,8$  [9].

Проте у ММ передбачена можливість уточнення зазначених ймовірностей з урахуванням специфіки процесів виявлення об'єктів відповідними засобами розвідки. Розглянемо порядок їх розрахунку.

Блок 2а забезпечує визначення ймовірності виявлення БпЛА радіолокаційними засобами ( $p_{\text{в1}}$ ). З цією метою часто застосовуються аналітичні вирази [9; 12; 13]

$$\begin{aligned} P(D) &= \exp(-D/D_0)^4, \\ D &= D_0 \sqrt[4]{-\ln P(D)}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $D$  – поточне значення відстані до цілі,  $D \in [0, D_{\text{max}}]$ ;

$D_0$  – відстань, яка для радіолокаційних станцій (далі – РЛС) імпульсного випромінювання з урахуванням втрат у системі та ослаблення електромагнітних хвиль у просторі, визначається за типовим виразом [11]

$$D_0 = \sqrt[4]{\frac{P_r \cdot \eta \cdot G_0^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 \cdot P_{\text{пр min}} \cdot q \cdot K}} \cdot 10^{-0,005al}, \quad (3)$$

де  $P_r$  – потужність генератора;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії антенно-фідерного тракту ( $\eta < 1$ );

$G_0$  – коефіцієнт підсилення антени;

$\lambda$  – довжина хвилі, м;

$\sigma_{\text{ц}}$  – ефективна відбивна поверхня цілі, м<sup>2</sup>;

$P_{\text{пр min}}$  – чутливість приймача, Вт;

$q$  – параметр виявлення (відношення енергії корисного сигналу до спектральної густини перешкод);

$K$  – сумарний коефіцієнт загасання системи, дБ;

$\alpha$  – коефіцієнт ослаблення електромагнітних коливань в атмосфері (дБ/км) на інтервалі проходження  $l$  (км).

Очевидно, що застосування виразів (2) та (3) для визначення шуканої ймовірності ( $p_{\text{в1}}$ ) потребує значної кількості вихідних даних і є виправданим лише у разі розуміння під «системою РЕБ» певного локального комплексу засобів, у складі якого є РЛС із апріорно відомими переліченими параметрами.

Тому у блоці 2а для визначення ймовірності ( $p_{\text{в1}}$ ) пропонується скористатись кривими виявлення, які показують взаємозв'язок параметра виявлення ( $q$ ), ймовірностей хибних тривог ( $p_{\text{хт}}$ ) та правильного виявлення ( $p_{\text{пв}}$ ). Для випадку вузькосмугового імпульсного радіолокаційного сигналу такі криві описуються співвідношенням [13]

$$p_{\text{в1}} = p_{\text{пв}} = \frac{q - \Phi(1 - p_{\text{хт}})}{1 + q}, \quad (4)$$

де  $\Phi(*)$  – інтеграл ймовірності.

Подібний підхід до визначення ймовірності виявлення БпЛА засобами радіолокаційної розвідки через ймовірність хибних тривог не суперечить критерію Неймана-Пірсона, оптимальний характер якого полягає у максимізації ймовірності правильного виявлення за фіксованої ймовірності хибних тривог ( $p_{\text{хт}}$ ) та параметру виявлення ( $q$ ) [14; 15].

Значення  $p_{\text{хт}}$  обирається для усіх радіолокаційних засобів, що входять до системи РЕБ з БпЛА, як середнє інтервальне практичних значень цього параметру, який для сучасних РЛС знаходиться у межах від  $10^{-4}$  до  $10^{-8}$  [11], а за іншими джерелами – у межах від  $10^{-6}$  до  $10^{-10}$ . Тобто для розрахунків можна прийняти середнє медіанне значення наведених інтервалів  $\tilde{p}_{\text{хт}} \approx 10^{-7}$ .

Значення параметру виявлення ( $q$ ) пропорційне значенням коефіцієнта шуму приймача РЛС ( $\kappa_{\text{ш(дБ)}}$ ), які для більшості відомих зразків знаходяться у межах 0,5–16 дБ або у безрозмірних одиницях з урахуванням формули переведення  $\kappa_{\text{ш}} = 10^{\kappa_{\text{ш(дБ)}/10}$  – від 1,12 до 39 (зокрема, для радіовисотоміру см-діапазону типу ПРВ-16  $\kappa_{\text{ш}} = 7-14$ ). Отже значення параметру виявлення ( $q$ ) може бути обране як середнє медіанне у межах  $\tilde{q} \approx 4-10$ , що відповідає середнім значенням цього параметру, наведеним на графіках кривих виявлення у [12] і [14].

Для уточнення параметру ( $p_{\text{в2}}$ ) у блоці 2б пропонується використати підхід щодо розрахунку ймовірності виявлення випромінювання РЕЗ апаратурою радіотехнічної розвідки (далі – РТР) [14], відповідно до якого ймовірність виявлення БпЛА засобами радіотехнічної розвідки системи

РЕБ може бути визначена аналітичним шляхом через імовірність хибних тривог ( $p_{\text{хт}}$ ):

$$p_{\text{вз}} = p_{\text{хт}}^{\frac{1}{1+0,5r^2}}, \quad r^2 = \frac{\lambda^2}{64\pi^2} \cdot \frac{P_{\text{екв}}^{\text{в}}}{P_{\text{екв}}^{\text{п}} \cdot D^2}, \quad (5)$$

$$P_{\text{екв}}^{\text{в}} = P^{\text{в}} \cdot G_0, \quad P_{\text{екв}}^{\text{п}} = \frac{P^{\text{п}}}{G_{\text{п}}},$$

де  $G_0$ ,  $G_{\text{п}}$  – відповідно коефіцієнти направленої дії передавальної антени на БпЛА у напрямку апаратури розвідки та коефіцієнта направленої дії антени приймача РТР;

$P^{\text{в}}$  і  $P_{\text{екв}}^{\text{в}}$  – потужність та еквівалентна потужність бортового передавача на БпЛА;

$P^{\text{п}}$  і  $P_{\text{екв}}^{\text{п}}$  – гранична та еквівалентна чутливість розвідувального приймача;

$D$  – відстань від приймача РТР системи РЕБ до БпЛА.

Наведені у виразі (5) параметри обираються як середні медіанні значення  $\{\tilde{p}_{\text{хт}}; \tilde{G}; \tilde{P}^{\text{п}}; \tilde{D}\}$  для типових засобів РТР, які входять до складу системи РЕБ з БпЛА.

Значення ( $D$ ) згідно із характеристиками деяких засобів РЕБ (РТР) знаходиться у діапазоні від 0 км до 25 км (для засобів РЕБ типу «Нота» – до 10 км, «Буковель» – до 25 км, комплексу радіорозвідки «Пластун RP3000» – до 15 км), хоча у реальній обстановці, як свідчать результати полігонних випробувань, це значення у середньому не перевищує 4–5 км.

Найбільш складним є визначення ймовірності виявлення БпЛА засобами оптико-електронної розвідки ( $p_{\text{вз}}$ ). Сучасні пасивні проєкційні методи, які базуються на застосуванні відеокамер з фоточутливими матрицями денного, нічного або теплового бачення, переважно описують процеси виявлення, розпізнавання повітряних об'єктів, визначення їх кутових координат, оцінювання дальності дії [16]. Методологія у галузі оптико-електронних систем є розгалуженою і містить опис моделей сигналів, їх приймання та перетворення, виявлення об'єктів, фільтрації, оцінювання дальності дії ОЕЗ, оптичної обробки інформації, а також ММ оптичних систем. Проте переважна більшість моделей оцінювання ймовірності виявлення об'єктів оптичними (оптико-електронними) засобами наразі є занадто абстрактними. Зокрема, у [17] ММ оцінювання ймовірнісних характеристик виявлення об'єктів базується на положеннях теорії виявлення сигналів, у якій використано ймовірності прийняття правильних і помилкових рішень (тобто умовних ймовірностей правильного виявлення та хибних тривог) або універсальна характеристика «середнього ризику». Авторами [17] визнається, що оцінювання системи виявлення за такими моделями на практиці пов'язано з проблемою отримання апріорних значень безумовних ймовірностей і ваги помилкових рішень. Тобто, такі моделі можуть бути використані за детермінованих умов функціонування системи з

використанням накопиченого досвіду, здорового глузду та, певною мірою, інтуїції.

Для уникнення невиправданого ускладнення моделі для визначення параметра ( $p_{\text{вз}}$ ) пропонується скористатись методами теорії кваліметрії. На практиці, кваліметричні моделі є корисними, а іноді й безальтернативними, під час вимірювання якості об'єктів (процесів). Вони базуються на кількісних оцінках (рейтингах), які дають змогу порівнювати різні аспекти якості об'єктів або процесів і приймати обґрунтовані рішення.

З урахуванням зазначеного у блоці 2в пропонується використати підхід [14], який пов'язує видимість об'єкта ( $V$ ) з якісними характеристиками інтенсивності зорового сприйняття та значеннями «порогового контрасту зору» ( $\epsilon$ ). У цьому підході враховано такі правила:

1. Видимість об'єкта під час спостереження більшою мірою залежить від кутових розмірів об'єкта, його форми, тривалості спостереження та фонового контрасту об'єкта спостереження ( $K$ ). Видимість об'єкта оцінюється як інтенсивність зорового сприйняття розбіжностей між об'єктом і фоном та виражається числом ( $V$ ), яке показує у скільки разів контраст об'єкта перевищує пороговий контраст зору ( $\epsilon$ ) для об'єкта заданої форми та кутових розмірів.

2. Реакція приймача прямо залежить від співвідношення яскравості поверхньої об'єкта та фону. Це означає, що можливості ОЕЗ з виявлення об'єктів (а також і шукане значення ймовірності  $p_{\text{вз}}$ ) у першу чергу визначаються фоновим контрастом об'єкта спостереження (контрастом між фоном та об'єктом за яскравістю):

$$K = 1 - B_{\text{min}} / B_{\text{max}}, \quad (6)$$

де  $B_{\text{max}(min)}$  – максимальна та мінімальна яскравість контрастуючих поверхонь об'єкта та фону.

3. Мінімальне значення показника ( $K$ ), за якого ще спостерігається відмінність у яскравості об'єкта і фону, тобто коли об'єкт ще виявляється, є пороговим контрастом. У випадку  $B_{\text{min}} = B_{\text{max}} \rightarrow K = 0$  – контраст між фоном і об'єктом відсутній, об'єкт не спостерігається, а у разі  $B_{\text{min}} = 0 \rightarrow K = 1$  – контраст максимальний, об'єкт виявляється. Оскільки отримання значень яскравості об'єктів ( $B$ ) становить окрему комплексну проблему, у дуальних задачах маскування / виявлення об'єктів прийнято використовувати шкалу отриманих статистичними методами значень коефіцієнтів контрасту [13], які саме й характеризують параметр фонового контрасту об'єкта спостереження ( $K$ ):

$K \leq 0,2$  – непомітний контраст;

$0,2 < K < 0,3$  – непомітний контраст;

$0,3 \leq K < 0,6$  – помітний контраст;

$K \geq 0,6$  – різко помітний контраст.

4. Пороговий контраст зору ( $\epsilon$ ) залежить від кутових розмірів та форми об'єктів спостереження. Значення ( $\epsilon$ ), за якого при заданому контрасті ( $K$ ) об'єкт не виявляється, вважається порогом зникнення об'єкта ( $\epsilon_{\text{зн}}$ ).

5. Видимість ( $V$ ) характеризується кількістю порогових контрастів (порогів зникнення об'єкта), які містяться у заданому контрасті ( $K$ ):

$$V = K / \varepsilon_{\text{зн}} \quad (7)$$

Подію «зникнення об'єкта» можна вважати протилежною відносно події «виявлення об'єкта», а враховуючи, що пороговий контраст зору

змінюється у межах  $\varepsilon \in [0; 1]$  (як і значення ймовірності), на підставі виразу (7) можна визначити шукану ймовірність виявлення БпЛА засобами оптико-електронної розвідки:

Таблиця 1

Орієнтовні значення видимості об'єктів удень та відповідні якісні характеристики інтенсивності зорового сприйняття [14]

Загальна характеристика інтенсивності зорового сприйняття	Значення $V_{\text{п}}$
Об'єкт не спостерігається (яскравість об'єкта і фону сприймаються однаковими)	1
Під час фіксованого спостереження об'єкт ледве помітний у вигляді слабкого силуету, у разі пошуку об'єкт не виявляється	2
Під час фіксованого спостереження об'єкт виявляється одразу, у разі пошуку, об'єкт може бути не виявлено	2,5–3
Під час пошуку протягом 15–20 с об'єкт виявляється у вигляді слабкого силуету	4–5
Об'єкт виявляється швидко, деталі не сприймаються	5–8
Задовільна видимість, видні крупні деталі об'єкта	10–25
Хороша видимість, сприймаються розбіжності за кольором	25–35
Дуже хороша видимість	35–50

$$p_{\text{вз}} = 1 - \varepsilon_{\text{зн}} = 1 - \frac{K}{V_{\text{п}}} \quad (8)$$

де  $V_{\text{п}}$  – порогове значення видимості об'єктів, орієнтовні значення якого наведені у табл. 1.

У блоці 3 отримуються значення параметрів ( $p_1, p_2, p_3$ ), які є ймовірностями того, що БпЛА опиняться в зоні дії того або іншого засобу підсистеми виявлення системи РЕБ або ймовірностями того, що виявлення БпЛА в заданій зоні цими засобами відбудеться.

Ці значення можуть бути отримані на підставі «геометричного» підходу до визначення ймовірності «рівноправних» випадкових подій [18]. Якщо прийняти ймовірність елементарної події (появу БпЛА в будь-якій точці в межах зони відповідальності системи РЕБ або зони прикриття площею  $S_0$ ) незмінною, ймовірності ( $p_1, p_2, p_3$ ) можуть бути розраховані як співвідношення площі прикриття (зони дії) відповідних засобів розвідки (подавлення) до загальної площі об'єкта (зони відповідальності системи РЕБ).

Тобто, зазначені ймовірності є коефіцієнтами, які характеризують міру перетину площ зон або секторів дії відповідних засобів розвідки системи РЕБ та визначеної зони прикриття (зони відповідальності системи РЕБ). Тоді вирази для

$$p_{\text{в}} = p_{\text{в1}} \cdot p_1 \cdot (1 - p_{\text{в2}} \cdot p_2) \cdot (1 - p_{\text{в3}} \cdot p_3) + (1 - p_{\text{в1}} \cdot p_1) \cdot p_{\text{в2}} \cdot p_2 \cdot (1 - p_{\text{в3}} \cdot p_3) + (1 - p_{\text{в1}} \cdot p_1) \cdot (1 - p_{\text{в2}} \cdot p_2) \cdot p_{\text{в3}} \cdot p_3 + p_{\text{в1}} \cdot p_1 \cdot p_{\text{в2}} \cdot p_2 \cdot (1 - p_{\text{в3}} \cdot p_3) + p_{\text{в1}} \cdot p_1 \cdot (1 - p_{\text{в2}} \cdot p_2) \cdot p_{\text{в3}} \cdot p_3 + (1 - p_{\text{в1}} \cdot p_1) \cdot p_{\text{в2}} \cdot p_2 \cdot p_{\text{в3}} \cdot p_3 + p_{\text{в1}} \cdot p_1 \cdot p_{\text{в2}} \cdot p_2 \cdot p_{\text{в3}} \cdot p_3 \quad (10)$$

У Моделі подавлення бортових систем БпЛА у блоці 5 формуються повні групи подій «подавлення бортових систем БпЛА» (блок 5а) та «надійне подавлення бортових систем БпЛА» (блок 5б), які відповідно до обраної логіки другого

розрахунку зазначених ймовірностей можуть бути записані через функцію приналежності:

$$p_i = \mu(\Omega_{S_0} \cap \Omega_{S_i}) = \begin{cases} 0, & \Omega_{S_0} \cap \Omega_{S_i} = \emptyset, \\ 0 < \sum_i S_i^+ / S_0 \leq 1, & \Omega_{S_0} \subseteq \Omega_{S_i}, \\ i \in \{1, 2, 3\}, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\Omega_S$  – позначення області простору площею  $S$ ;

$S_i^+$  – частка площі об'єкта, яка перекривається зоною дії  $i$ -го засобу розвідки системи РЕБ з БпЛА,  $\text{m}^2$ .

Значення  $S_i^+$  у виразі (9) отримується з використанням аналітичних виразів для обчислення площ типових геометричних фігур, а для випадку множинного перетину – за допомогою методу Монте-Карло, який ґрунтується на законі великих чисел та теоремі про обчислення математичного сподівання функції від випадкової величини [19; 20]).

Відповідно до повної групи подій «виявлення БпЛА» (1) та з урахуванням отриманих значень ймовірностей  $\{p_{\text{в1}}, p_{\text{в2}}, p_{\text{в3}}\}$  і  $\{p_1, p_2, p_3\}$  у блоці 4 визначається ймовірність виявлення БпЛА противника в межах простору відповідальності системи РЕБ:

та третього правил, викладених вище, мають вигляд:

$$(A_{\text{нн}} \bar{A}_{\text{нк}} \bar{A}_{\text{оє}}; \bar{A}_{\text{нн}} A_{\text{нк}} \bar{A}_{\text{оє}}; \bar{A}_{\text{нн}} \bar{A}_{\text{нк}} A_{\text{оє}}), \quad (11)$$

$$(A_{\text{нн}} A_{\text{нк}} \bar{A}_{\text{оє}}; \bar{A}_{\text{нн}} A_{\text{нк}} A_{\text{оє}}; A_{\text{нн}} \bar{A}_{\text{нк}} A_{\text{оє}}; A_{\text{нн}} A_{\text{нк}} A_{\text{оє}}). \quad (12)$$

Основною функцією блоку 6 є уточнення ймовірностей подавлення засобами підсистеми РЕП бортових систем БпЛА:

$p_{пн}$  – навігаційних приймачів БпЛА;

$p_{пк}$  – бортових приймачів радіолинії керування та телеметрії БпЛА;

$p_{оє}$  – бортових ОЕЗ БпЛА.

Слід зазначити, що розрахунки цих імовірностей за традиційними аналітичними моделями потребують наявності значної кількості просторово-енергетичних параметрів системи РЕБ, наземного та бортового обладнання безпілотних авіаційних комплексів. Більшість параметрів зазвичай змінюються нелінійно, враховуючи динамічний характер процесів, що відбуваються в конфлікті «система РЕБ – БпЛА противника».

Тому, для уникнення невиправданого ускладнення моделі, у блоці 6 здійснюється ранжування вибірки для ймовірностей  $\{p_{пн}, p_{пк}, p_{оє}\}_j$ , заданих вихідними даними для множини  $j$ -их засобів РЕБ. На виході блоку отримується матриця медіанних значень  $\|\tilde{p}_*\|$ , елементи якої визначаються відповідно до [19]:

$$\left\| \begin{matrix} \tilde{p}_{пн} \\ \tilde{p}_{пк} \\ \tilde{p}_{оє} \end{matrix} \right\|, \tilde{p}_* = \begin{cases} \frac{(p_j + p_{j+1})}{2}, & n = 2j, \\ p_{j+1}, & n = 2j + 1, \end{cases} \quad n \in \square, \quad (13)$$

де  $n$  – кількість варіант у варіаційних рядах значень імовірностей  $\{p_{пн}, p_{пк}, p_{оє}\}_j$ .

Для оперативних розрахунків можна скористатись підходом до формування множини середніх значень імовірностей подавлення об'єктів засобами РЕБ, згідно із яким ці значення обираються на підставі узагальненого аналізу характеристик окремих засобів РЕБ та відомих інформаційно-бойових критеріїв оцінювання ефективності радіоелектронного подавлення, які характеризують інформаційний збиток, завданий противнику.

$$p_{пн} = P(A_{пн} \bar{A}_{пк} \bar{A}_{оє}) + P(\bar{A}_{пн} A_{пк} \bar{A}_{оє}) + P(\bar{A}_{пн} \bar{A}_{пк} A_{оє}) = p_{пн} p_{пк} \cdot (1 - p_{пк} p_{пк}) \cdot (1 - p_{оє} p_{оє}) + (1 - p_{пн} p_{пн}) \cdot p_{пк} p_{пк} \cdot (1 - p_{оє} p_{оє}) + (1 - p_{пн} p_{пн}) \cdot (1 - p_{пк} p_{пк}) \cdot p_{оє} p_{оє}, \quad (15)$$

$$p_{пн} = P(A_{пн} A_{пк} \bar{A}_{оє}) + P(\bar{A}_{пн} A_{пк} A_{оє}) + P(A_{пн} \bar{A}_{пк} A_{оє}) + P(A_{пн} A_{пк} A_{оє}) = p_{пн} p_{пн} \cdot p_{пк} p_{пк} \cdot (1 - p_{оє} p_{оє}) + (1 - p_{пн} p_{пн}) \cdot p_{пк} p_{пк} \cdot p_{оє} p_{оє} + p_{пн} p_{пн} \cdot (1 - p_{пк} p_{пк}) \cdot p_{оє} p_{оє} + p_{пн} p_{пн} \cdot p_{пк} p_{пк} \cdot p_{оє} p_{оє}, \quad (16)$$

Отримані значення ймовірностей  $p_{пн}$  та  $p_{пн}$  надалі порівнюються у блоці 10. У результаті порівняння на виході часткової моделі подавлення бортових систем БпЛА обирається максимальне з двох значень:

$$(p_{пн} > p_{пн}) \vee (p_{пн} < p_{пн}) \rightarrow \max\{p_{пн}; p_{пн}\}. \quad (17)$$

З урахуванням обраного ймовірнісного підходу, а також вихідних параметрів обох часткових моделей, за якими було отримано значення ймовірностей виявлення БпЛА і подавлення їх бортових систем, у блоці 11 визначається ймовірність зриву виконання завдань БпЛА в межах простору відповідальності системи РЕБ:

$$E_{рєб} = P_{рєб} = p_{в} \cdot \max\{p_{пн}; p_{пн}\}. \quad (18)$$

Зокрема, для засобу РЕБ в межах заявленої тактико-технічними характеристиками дальності подавлення середня ймовірність подавлення становить  $p=0,75-0,8$ , що забезпечує повну втрату радіозв'язку або зниження достовірності інформації в радіолиніях передачі даних понад 60–75%, що виключає можливість використання РЕЗ [21].

У блоці 7 отримуються значення параметрів  $\{p_{пн}, p_{пк}, p_{оє}\}$ , які є імовірностями того, що БпЛА опиняться в зоні дії того або іншого засобу подавлення системи РЕБ або імовірностями того, що подавлення БпЛА в заданій зоні цими засобами відбудеться.

Завдання вирішується аналогічно, як і у блоці 3, де для визначення подібних імовірностей використано «геометричний» підхід. Тобто вирази для розрахунку ймовірностей  $(p_{пн}, p_{пк}, p_{оє})$  можуть бути записані через функцію приналежності:

$$p_j = \mu(\Omega_{s_0} \cap \Omega_{s_j}) = \begin{cases} 0, & \Omega_{s_0} \cap \Omega_{s_j} = \emptyset, \\ 0 < \sum_j S_j^+ / S_0 \leq 1, & \Omega_{s_0} \subseteq \Omega_{s_j}, \\ j \in \{ "(пн)", "(пк)", "(оє)" \}, \end{cases} \quad (14)$$

де  $S_{ij}^+$  – частка площі об'єкта, яка перекривається зоною дії  $j$ -го засобу подавлення системи РЕБ з БпЛА,  $m^2$ .

Відповідно до сформованих у блоці 5 варіантів груп подій (11) і (12), а також з урахуванням отриманих імовірностей  $\{p_{пн}, p_{пк}, p_{оє}\}$  і матриці медіанних значень ймовірностей  $\|\tilde{p}_*\|$  у блоці 8 та блоці 9 відповідно визначаються імовірність події «подавлення бортових систем БпЛА» та ймовірність події «надійне подавлення бортових систем БпЛА» у заданій зоні.

Для цього використовуються наступні вирази:

З метою інтерпретації отриманих чисельних значень ефективності  $(E_{рєб})$  у блоці 12 здійснюється їх порівняння з інтервалами повної шкали бажаності Харрінгтона, яка має універсальний характер, часто застосовується у задачах оцінювання систем військового призначення [22; 23] і встановлює відповідності між фізичними і психофізичними параметрами (відкликами) досліджуваних об'єктів.

Отже за допомогою цієї шкали у лінгвістичному вигляді робиться висновок про ступінь (повноту) виконання завдань системою РЕБ  $\hat{E}_{рєб}$ :

ефективність «Гарантована»  $(0,8 \leq E_{рєб} \leq 1)$ ;

ефективність «Висока» ( $0,63 \leq E_{\text{реб}} < 0,8$ );  
 ефективність «Середня» ( $0,37 \leq E_{\text{реб}} < 0,63$ );  
 ефективність «Низька» ( $0,2 \leq E_{\text{реб}} < 0,37$ );  
 ефективність «Незадовільна» ( $0 \leq E_{\text{реб}} < 0,2$ ).

Запропонована шкала оцінок узгоджена із повною п'ятиступеневою шкалою бажаності Харрінгтона, що в подальшому дозволяє спільно оцінювати ефективність заходів системи РЕБ з БпЛА та системи протиповітряної оборони, яка нині оцінюється за подібними чисельно-якісними критеріями.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, у статті запропонована математична модель оцінювання ефективності системи радіоелектронної безпеки з безпілотними літальними апаратами, в основу якої покладено ймовірнісний підхід. За результатами дослідження:

здійснено опис процесів конфліктної взаємодії «система радіоелектронної боротьби – безпілотні літальні апарати противника»;

сформовано базові правила, що використовуються під час складання повних груп подій (процесів виявлення безпілотних літальних апаратів та подавлення їх бортових систем);

розроблено блок-схему моделі, яка дозволяє визначати кількісні значення часткових та загальних показників ефективності (відповідно – ймовірності виявлення безпілотних літальних апаратів, подавлення їх бортових систем та ймовірності зриву виконання завдань безпілотними літальними апаратами в межах простору відповідальності системи радіоелектронної боротьби). Крім того передбачена можливість лінгвістичної інтерпретації отриманих ймовірностей за допомогою психофізичних шкал оцінок.

Наукова новизна полягає у комплексному врахуванні у запропонованій математичній моделі типових ймовірнісних процесів виявлення безпілотних літальних апаратів (засобами радіолокаційної, радіотехнічної та оптичної розвідки)) та подавлення їх бортових радіоелектронних систем (навігації, управління та телеметрії, оптико-електронних засобів), поєднанні відносно простих аналітичних, ймовірнісних та кваліметричних моделей (методів) для отримання оцінок ефективності складної просторово-розподіленої системи за невеликого обсягу ввідних даних.

Отримані результати дослідження можуть бути практично використані для оперативного оцінювання (порівняння) різних варіантів систем радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами за допомогою логічно зрозумілої математичної моделі з отриманням чисельних значень ефективності та їх інтерпретації у лінгвістичному вигляді, що є зручним у процесі оцінювання, порівняння або синтезу перспективних варіантів подібних систем.

У подальших дослідженнях запропонована математична модель може бути удосконалена за рахунок детального розкриття згаданого у статті «геометричного» підходу до визначення ймовірностей того, що виявлення (подавлення) безпілотних літальних апаратів в заданій зоні відбудеться. Іншим напрямом удосконалення моделі може бути пошук раціональних за критерієм «адекватність-простота» часткових математичних моделей для розрахунку ймовірностей подавлення систем безпілотних літальних апаратів – навігаційних приймачів, приймачів радіолінії керування та телеметрії, бортових оптико-електронних засобів.

### Список бібліографічних посилань

1. Залужний В. Ф. Щодо сучасного дизайну військових операцій у російсько-українській війні: в боротьбі за ініціативу. 1 лютого 2024. URL: <https://www.zsu.gov.ua/2024/02/stattya-golovnokomaduvacha-zs-ukrayiny-general-a-valeriya-zaluzhnogo-shhodo-suchasnogo-dyzajnu-vijskovykh-operacij-u-rosijsko-ukrayinskij-vijni-v-borotbi-za-incipiatyvu>. (дата звернення 07.02.2024). 2. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Воениздат, 1989. 350 с. 3. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: учеб. пос. Москва : Вузовская книга. 2007. 356 с. 4. Головін Ю. О., Могилевич Д. І. Основи теорії радіозв'язку теоретичні основи та практичні аспекти : методич. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2023. 248 с. 5. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль : навч. посіб. для студентів. Київ : Національний технічний університет «КПІ». 2014. 336 с. 6. Шолохов С. М., Самборський І. І., Вакулєнко О. В., Ніколаєнко Б. А. Завадозахист радіоелектронних засобів. Частина 1. Основи завадозахисту систем зв'язку: навчальний посібник. Київ: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. 210 с.

7. Мезенцев О. В., Шовкошитний І. І. Особливості методичного підходу оцінювання ефективності застосування оптико-електронних засобів захисту від високоточної зброї. *Зб. наук. пр. ЦНДІ ЗС України*. 2005. № 1(31). 183 с. 8. Николенко Н. Ф. Основы теории РЕБ. Москва : Воениздат, 1987. 351 с. 9. Романченко І. С., Денєжкін М. М., Гусак Ю. А., Можаровський В. М., Годзь С. В., Дейнега О. В., Шовкошитний І. І. та ін. Основи військово-теоретичних досліджень: нові реалії та технології. Моногр. в 4 т. Київ : ЦНДІ ЗС України, 2022. Т. 2. Дослідження проблем будівництва Збройних Сил / За заг. ред. професора Романченка І. С. Київ : ЦНДІ ЗС України, 2022. 332 с. 10. Husak Y., Starynskyi I., Shovkoshytnyi I., Shevchenko V., Marchenko A. Security of important state objects from terrorist actions with the use of attack unmanned aerial vehicles. *SDirect 24 – Safety, Society, Science*. 2020. № 3(13). p. 42–53. URL: [www.sdirect24.org/natodrpndno1](http://www.sdirect24.org/natodrpndno1) (дата звернення 07.02.2024). 11. Вентцель Е. С. Теория вероятности. Изд. 4-е. Москва : Наука, 1969. 576 с. 12. Торопчин А. Я., Романенко І. О., Даник Ю. Г., Пашенко Р. Е. та ін. Довідник з протиповітряної оборони. Київ : МО України, Харків : ХВУ. 2003. 368 с.



13. Романченко І. С., Шускін В. О., Хазанович О. І., Марко І. Ю. Теоретичні основи аналізу, моделювання та синтезу системи матеріально-технічного забезпечення як просторово-розподіленої системи : монографія. Київ. ЦНДІ ЗС України. 2013. 221 с.
14. Меньшаков Ю. К. Защита объектов и информации от технических средств разведки : уч. пос. Москва : РГГУ. 2002. 399 с.
15. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / Под ред. Ю. А. Феоктистова. Москва : Радио и связь, 1988. 216 с.
16. Карташов В. М., Корытцев И. В., Шейко С. А., Олейников В. Н., Зубков О. В., Бабкин С. И. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат. *Радиотехника : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* Харків. 2020. Вип. 202. С. 153-159.
17. Мосягин Г. М., Немтинов В. Б., Лебедев Е. Н. Теория оптико-электронных систем: учебник для студентов вузов по оптическим специальностям. Москва : Машиностроение, 1990. 432 с.
18. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. Москва : Радио и связь, 1983. 416 с.
19. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика : посіб. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2008. 494 с.
20. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пос. Изд. 9-е. Москва : Высшая школа. 2003. 479 с.
21. Шовкошительний І. І. Методичний підхід до обґрунтування вимог до швидкодії засобів (комплексів) постановки перешкод системам радіозв'язку. *Зб. наук. пр. ЦНДІ ЗС України.* Київ. 2010. № 1 (51). С. 31–39.
22. Думенко М. П. Методологічні основи оцінювання ефективності системи комплектування особовим складом Збройних Сил України в умовах гібридної війни (особливого періоду). *Сучасні інформаційні технології в сфері безпеки і оборони.* 2019. № 1(34). С. 167–174. DOI: 10.33099/2311-7249/2019-34-1-167-174.
23. Комісаров М. В., Підгородецький М. М. Методика оцінювання ефективності виконання заходів протиміної діяльності. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони.* 2022. № 1(43). С. 13–18. DOI: 10.33099/2311-7249/2022-43-1-13-18.

### MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE ELECTRONIC WARFARE SYSTEM AGAINST UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON A PROBABILISTIC APPROACH

*Shovkoshytnyi Ihor (Candidate of Military Science, Senior Research Fellow)*

*National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

**Formulation of the problem in general.** Growing role of electronic warfare systems versus unmanned aerial vehicles is one of the trends of the Russian-Ukrainian war. The combat use of such systems requires an assessment of the effectiveness of the processes that occur in the conflict between the forces and means of radio-electronic warfare and the enemy's unmanned aerial vehicles. Such an assessment is necessary for the selection of technical solutions during the development of weapons, as well as the synthesis of local and spatially distributed countermeasures against unmanned aerial vehicles. The formation of such systems is still ongoing in Ukraine. Mathematical models should be a base of assessment tools which must have a reasonable balance between sufficient accuracy, completeness of system capabilities (objects) and simplicity of their modeling. Probability models with such specs are commonly applied in military industries.

**Research methods.** Following methods and theories were applied during case study: principles of the systematic approach, methods of probability theory, systems modeling, elements of the theory of signal detection and methods of the theory of qualimetry.

**Analysis of recent researches and publications.** It was determined that the modeling of the functioning of radio-electronic warfare systems mainly covers the description of jamming signals, the structure of radio-electronic warfare devices, their individual structural or functional components, individual processes, etc. The majority of existing models cover the effect of radio interference in details only for certain subset of on-board equipment installed in unmanned aerial vehicles. Some models are too abstract. At present there is no such single mathematical model which can cover all functioning aspects of radio-electronic warfare system in combat with unmanned aerial vehicles.

**Presenting the main material.** Key results of case study: processes of "radio-electronic warfare system - unmanned aerial vehicles of the enemy" conflict were described; ground rules were formed which are used in mathematical models during full group events design (detection and suppression processes); mathematical model block diagram was designed, diagram describes quantitative values of partial and overall performance indicators (probability of detecting unmanned aerial vehicles, probabilities of suppressing their on-board systems and the probability of disruption of tasks by unmanned aerial vehicles in the area of responsibility of the radio electronic warfare system). In addition, the model provides the possibility of linguistic interpretation of the received probabilities using psychophysical rating scales.

**Elements of scientific novelty.** Scientific novelty is expressed in broad coverage in suggested mathematical model of typical probabilistic processes of detection of unmanned aerial vehicles (by means of radar, radio technical and optical reconnaissance) and suppression of their on-board radio electronic systems (navigation, control and telemetry, optical-electronic means), a combination of relatively simple analytical, probabilistic and qualitative models (methods) for obtaining estimates of the effectiveness of a complex spatially distributed system with a small amount of input data.

**Practical significance of the article.** Obtained research results can be applied in quick assessment (comparison) of various of electronic warfare systems with unmanned aerial vehicles using an understandable mathematical model. Efficiency can be represented in numeric values and can be interpreted in a convenient linguistic form applied for evaluation, comparison or synthesis of similar variants of systems.

**Conclusion and the perspectives of future researches.** In further research, the mathematical model can be improved due to the disclosure of a "geometric" approach to determining the probabilities that the detection (suppression) of unmanned aerial vehicles in a given area. Development of rational partial models which follow "adequacy-simplicity" principle for calculating the probabilities of suppression of on-board systems of unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** mathematical model, effectiveness evaluation, electronic warfare system, countering unmanned aerial vehicles, probability.

## References

- Zaluzhnyi, V. F.** On the Modern Design of Military Operations in the Russian-Ukrainian War: In the Struggle for Initiative. 1 lyutoho 2024. Available at: <https://www.zsu.gov.ua/2024/02/stattya-golovnokomanduvacha-zs-ukrayiny-general-valeriya-zaluzhnogo-shhodo-suchasnogo-dyzajnu-vijskovykh-operacij-u-rosijsko-ukrayinskij-vijni-v-borotbi-za-inicizatyvu>. [Accessed: 07 February 2024].
- Paly, A. I.** (1989). Radio electronic warfare. 2nd ed., revised. and additional. Moskva : Vuzovskaya knyha, 350.
- Kupriyanov, A. I., Sakharov, A. V.**, (2007). Theoretical foundations of electronic warfare: textbook. Moskva : University book, 356.
- Golovin, Yu. O., Mogilevich, D. I.**, (2023). Fundamentals of the theory of radio communication, theoretical foundations and practical aspects: methodological. posib. Kiev: KPI im. Igor Sikorsky, 248.
- Polinsky, V. V.**, (2014). Technical electrodynamics and expansion of radiokhvil: navch. posib. for students. Kiev: National Technical University "KPI". 336.
- Sholokhov, S. M., Samborsky, I. I., Vakulenko, O. V., Nikolaenko, B. A.**, (2021). Interference protection of radioelectronic devices. Part 1. Fundamentals of systems management: basic handbook. Kiev: ISZZI KPI im. Igor Sikorsky. 210.
- Mezentsev, O. V., Shovkoshitny, I. I.**, (2005). Peculiarities of the methodical approach to evaluating the effectiveness of the use of optical-electronic means of protection against high-precision weapons. *Collection of scientific works of the Center for the Armed Forces of Ukraine*, 1(31), 183.
- Nikolenko, N. F.** Basics of the REB theory, (1987). Moskva : Voenizdat, 351.
- Romanchenko, I. S., Denezhkin, M. M., Husak, Yu. A., Mozharovskiy, V. M., Godz, S. V., Deinega, O. V., Shovkoshitny, I. I.** and others, (2022). Basics of military-theoretical research: new realities and technologies. Monogr. in 4 volumes. Kyiv : Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine. Vol. 2. Study of the problems of construction of the Armed Forces. In general ed. Professor I. S. Romanchenko. Kyiv : Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine., 332.
- Husak, Y., Starynskyi, I., Shovkoshytnyi, I., Shevchenko, V., Marchenko, A.**, (2020). Security of important state objects from terrorist actions with the use of attack unmanned aerial vehicles. *SDirect 24 – Safety, Society, Science*. № 3(13). p. 42–53. Available at: [www.sdirect24.org/natodrpndno1](http://www.sdirect24.org/natodrpndno1) [Accessed: 07 February 2024].
- Wentzel, E. S.**, (1969). Theory of probability. Ed. 4th Science. Moskva : Nauka, 576.
- Directory of an officer of anti-aircraft defense** (1981) / under the editorship. H. V. Zimyna. Moskva : Voenizdat, 431.
- Romanchenko, I. S., Shuenkin, O. I., Marko, I. Yu.**, (2022). Theoretical bases of analysis, modeling and synthesis of the logistics system as a spatially distributed system: monograph. Kyiv : Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, 221.
- Menshakov, Yu. K.**, (2002) Protection of objects and information from technical means of intelligence: a textbook, Moskva : RGGU 399.
- Theory and methods of evaluating the electromagnetic compatibility of radio-electronic devices** (1988) / Ed. Yu. A. Feoktistova. Radio and communication, Moskva : Radio i svyaz', 216.
- Kartashov, V. M., Korytsev, I. V., Sheyko, S. A., Oleinikov, V. N., Zubkov, S. I.**, (2020). Optical-electronic methods of detecting aerial objects and measuring their coordinates. Radio equipment: *All-Ukraine. between science and technology coll.* Kharkiv. 202, 153–159.
- Mosyagin, G. M., Nemtynov, V. B., Lebedev, E. N.**, (1990). Theory of optical-electronic systems: a textbook for students of universities in optical specialties. Moskva : Mashinostroyeniye, 432.
- Wentzel, E. S., Ovcharov, L. A.**, (1983). Practical problems of probability theory. Moskva : Radio i svyaz', 416.
- Kartashov, M. V.**, (2008). Probability, processes, statistics: manual. Kyiv : Kyiv University Publishing and Printing Center, 494.
- Gmurman, V. E.**, (2003). Probability theory and mathematical statistics: textbook. Ed. 9th., Moskva : Vysshaya shkola. 479.
- Shovkoshytnyy, I. I.**, (2010). A methodical approach to justifying requirements for the speed of means (complexes) of jamming radio communication systems. *Collection of scientific works of the Center for the Armed Forces of Ukraine*. 1(51), 31–39.
- Dumenko, M. P.**, (2019). Methodological bases for evaluating the effectiveness of the personnel system of the Armed Forces of Ukraine in the conditions of a hybrid war (special period). *Suchasni informatsiyini tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony*. 1(34), 167–174. DOI: 10.33099/2311-7249/2019-34-1-167-174.
- Komisarov, M. V., Pidhorodets'kyi, M. M.**, (2022). Methodology for evaluating the effectiveness of demining measures. *Suchasni informatsiyini tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony*, №1(43), 13–18. DOI: 10.33099/2311-7249/2022-43-1-13-18.