

DOI: 10.46972/2076-1546.2026.30.14

УДК 623.1/7

**Д. А. Іщенко**, канд. техн. наук, доц.  
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0001-9743-3889>

**В. В. Стрінада**, канд. техн. наук, доц.  
Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-0604-7673>

### **ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПРИКРИТТЯ ОБ'ЄКТА ЗА КОНЦЕПТУАЛЬНОЮ МОДЕЛЛЮ ПОХИБОК НАВІГАЦІЇ УДАРНИХ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ**

*У статті досліджено результативність радіоелектронного прикриття об'єкта, що здійснюється з використанням засобів радіоелектронної боротьби, як ступінь зниження ефективності ударів безпілотних систем, яка розглядається, зокрема, як реалізація їх можливостей щодо високоточних ударів по цілях. Такі можливості безпілотних систем безпосередньо залежать від використання різних систем навігації, передусім інерціальних. Функціонування безпілотних систем автономне, але воно передбачає комплексування із системами навігації, що працюють із зовнішніми джерелами навігаційної інформації. Підтримання точності наведення полягає в періодичному корегуванні даних інерціальних навігаційних систем із даними, отриманими бортовими радіоелектронними засобами каналів глобальних супутникових навігаційних систем. За його відсутності, кількість помилок визначення координат власного місцеположення та їх змін у часі збільшується, це погіршує навігацію безпілотних систем щодо наведення на запрограмовані об'єкти. Зростання середньоквадратичних помилок у системах навігації місцеположення безпілотних систем, що є пропорційним до часу подавлення каналів глобальних супутникових навігаційних систем, зменшує ймовірність влучання в ціль і, відповідно, знижує їх ефективність.*

*У сучасних бойових діях масоване застосування безпілотних систем зумовлює комплексні виклики для сил і засобів радіоелектронної боротьби, зокрема щодо подавлення каналів глобальних супутникових навігаційних систем засобів повітряного нападу. У статті запропоновано концептуальну модель похибок навігації, яка поєднує класичні метричні показники точності (кругове ймовірне відхилення та середньоквадратичне відхилення за відстанню) із практичними моделями зростання похибки інерціальних навігаційних систем за впливом засобами радіоелектронної боротьби, перешкодами на бортові радіоелектронні засоби каналів глобальних супутникових навігаційних систем засобів повітряного нападу. Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність радіоелектронного прикриття об'єкта не лише за параметрами похибок, а й за показниками, що визначаються факторами*

© Д. А. Іщенко, В. В. Стрінада, 2026

радіоелектронної обстановки. Це забезпечує можливість адаптації апарату оцінювання до реальних умов та створює основу для багаторівневого планування ресурсів у системі протидії безпілотним загрозам.

**Ключові слова:** безпілотна система; глобальна супутникова навігаційна система; інерціальна навігаційна система; засоби повітряного нападу; система навігації; кругове ймовірне відхилення; похибка навігації; середньоквадратичне відхилення; радіоелектронна боротьба; ефективність прикриття.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Масове застосування безпілотних систем (БпС) у сучасних бойових діях радикально змінює характер загроз та вимоги до систем протидії. БпС охоплюють широкий спектр платформ – від малих розвідувальних апаратів до ударних комплексів, що діють у повітрі, на землі та в морському середовищі. Їхня ефективність, з огляду на точність доставляння корисного навантаження в потрібне місце в заданий час, обмежується навігаційними можливостями, а саме похибками визначення власного місцеположення в просторі та часі, що змінюються. Такі можливості БпС безпосередньо залежать від характеристик різних систем навігації (СН), передусім уже традиційних – автономних інерціальних навігаційних систем (ІНС). Елементи ІНС, зокрема гіроскопи, прилади стабілізації, автопілоти, курсовказувачі, датчики кутової швидкості та інші компоненти пілотажно-навігаційних комплексів, широко застосовують у безпілотних літальних апаратах (БпЛА) різних класів. Залежності від вимог за призначенням до БпС визначають потрібні (припустимі, граничні) помилки наведення, що обумовлює застосування в їх СН елементів різних класів ІНС, що відрізняються технічною досконалістю та відповідною вартістю.

Аналіз досвіду застосування БпС різного класу підтверджує:

по-перше, можливість застосування ІНС різного ступеня точності: мікроелектромеханічних систем, волоконно-оптичних гіроскопів, лазерних гіроскопів із кільцевим резонатором та гіроскопів з напівсферичним резонатором, що комплексуються комбінованими рішеннями із застосуванням високоточних технологій кінематичної навігації в реальному часі (Real Time Kinematic – RTK) та антен із керованою діаграмою спрямованості приймання (АКДС);

по-друге, функціонування таких систем автономне, але застосування ІНС у СН БпС передбачає корегування даних шляхом комплексування з навігаційними системами, що працюють із зовнішніми джерелами навігаційної інформації;

по-третє, за відсутності можливості такого корегування, помилки визначення координат власного місцеположення та їх змін у часі зростають (пропорційно до часу неможливості корегування), що погіршує навігацію БпС щодо наведення на запрограмовані об'єкти;

по-четверте, як правило, підтримання точності наведення включає періодичне корегування даних ІНС із тими, що отримані бортовими радіоелектронними засобами (РЕЗ) каналів глобальних супутникових навігаційних систем (ГСНС);

по-п'яте, залежність БпС від навігаційних технологій, що передбачають застосування бортових приймальних РЕЗ у каналах супутникової навігації, робить їх вразливими до радіоелектронних перешкод, організованих із використанням засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Отже, зростання середньоквадратичних помилок у СН БпС, пропорційне до часу подавлення каналів ГСНС, зменшує ймовірність влучання в ціль і, відповідно, знижує їх ефективність.

Водночас для ефективного радіоелектронного прикриття (РЕПр) об'єктів від розвідки й високоточних ударів БпС (включно з БпЛА) та іншими засобами повітряного нападу (ЗПН) (керованими (корегованими) авіаційними бомбами, а також крилатими, аеробалістичними та балістичними ракетами) необхідно мати інструменти, що дозволяють кількісно оцінювати похибки навігації та прогнозувати їхній вплив на результативність бойового застосування. За відсутності таких інструментів оцінювання ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації виникає проблема планування застосування як засобів РЕБ, так і БпС в умовах навігаційного протиборства (навігаційної війни).

З огляду на викладене вище можна стверджувати, що дослідження підходів до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта засобами РЕБ за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС є актуальним науково-практичним завданням, а розроблення такого науково обґрунтованого підходу є підґрунтям для розв'язання проблеми планування застосування цих засобів в умовах навігаційного протиборства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні роки характеризуються стрімким зростанням кількості досліджень, присвячених проблемі протидії БпС та розвитку засобів РЕБ. Аналіз літературних джерел показує, що ця тематика охоплює як фундаментальні стандарти кількісного оцінювання, так і прикладні військові доктрини, аналітичні огляди сучасних конфліктів та технічні звіти [1, 2].

Теоретичні основи та класичні моделі заклали фундамент для використання метрик кругового ймовірного відхилення (КЙВ) та середньоквадратичного відхилення (СКВ) у [1, 2]. Показано, що ймовірнісні моделі є універсальним інструментом для оцінювання точності СН і дають математичний апарат, який можна адаптувати до сучасних сценаріїв застосування БпЛА та РЕБ.

У статтях [3, 4] досліджено похибки ІНС, показано їх анізотропію та запропоновано моделі дрейфу. У [5–8] деталізовано джерела похибок ІНС та методи їх компенсації. Зазначено, що похибки ІНС зростають із часом, тому моделювання їхнього дрейфу є критичним для оцінювання ефективності РЕБ.

У [9–16] показано різні рівні точності ГСНС у базовому режимі та в режимі RTK, який значно знижує похибки, але залежить від корекційних сигналів, що можуть бути заблокованими засобами РЕБ. Доведено, що ГСНС є вразливим до глушіння та спуфінгу, що, відповідно, підтверджує актуальність моделювання впливу РЕБ.

Приклад високої точності цивільних БпЛА продемонстровано в [9]. У [10–12] описано військовий БпЛА, який модернізовано з базового ГСНС до RTK. Зазначено, що порівняння цих платформ показує різні рівні точності та стійкості до РЕБ.

У публікаціях [13–15] висвітлено доктрини та стандарти електронної боротьби, моделі похибок сенсорів та методи тестування.

У [4–10] проаналізовано ефективність засобів РЕБ Збройних Сил (ЗС) України проти крилатих ракет і БпЛА, показано практичні результати та перспективи їх розвитку.

Підтверджено, що РЕБ реально збільшує похибки навігації противника, знижуючи ймовірність ураження.

У підсумку отримано висновок у контексті узагальнення результатів аналізу досліджень і публікацій щодо проблем навігації безпілотних платформ у певній сукупності факторів та умов сучасних бойових дій:

по-перше, зібрана інформація надає можливість для формування теоретичної бази оцінювання ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС;

по-друге, обмежена кількість робіт, що поєднують теоретичні моделі похибок із практичними рекомендаціями для планування зон прикриття, не надають науково-обґрунтованого підходу до оцінювання ефективності РЕПр.

**Формулювання завдання дослідження.** За викладених вище умов необхідним є розроблення науково обґрунтованого підходу до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС, що заповнює прогалину між теоретичними моделями та реальними бойовими сценаріями.

Така модель повинна враховувати похибки ІНС та ГСНС, фактори РЕБ, переводити їх у практичні метрики ефективності прикриття. Інтеграція цих складових у єдиний порядок забезпечить можливість моделювання впливу РЕБ, підвищить достовірність прогнозування результатів бойового застосування та сприятиме формуванню практичних рекомендацій щодо оптимізації як РЕПр, так і використання безпілотних платформ.

Досягнення поставленої мети передбачає, що за результатами аналізу наукових джерел та реального досвіду з проблематики інерціальної навігації необхідно вирішити часткові взаємопов'язані завдання:

систематизувати формули визначення КЙВ та СКВ для оцінювання точності навігаційних систем [1, 2];

визначити особливості похибок ІНС, їх анізотропію, враховуючи різні класи систем [3, 4];

розробити системи показників для оцінювання ефективності застосування ІНС БпС та засобів РЕБ для РЕПр, зокрема коефіцієнт доступності, радіуси покриття, імовірність промаху та інші операційні метрики.

Отже, дослідження спрямоване на розроблення універсального підходу до оцінювання протиставних значень ефективності засобів РЕБ і БпС в умовах подавлення супутникових каналів навігації, а також ефективності РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС, який поєднує теоретичні засади та практичні приклади, забезпечує концептуальний аналіз похибок навігації та дозволяє їх оцінювати. Реалізація поставлених завдань стане основою для розроблення методичних рекомендацій, що підвищать якість планування та застосування сучасних безпілотних платформ і засобів РЕБ для реалізації їх можливостей щодо ураження та прикриття наземних об'єктів.

**Виклад основного матеріалу.** У реальних умовах ресурсних обмежень під час планування бою розробляти варіанти дій сил і засобів РЕБ так само, як і БпС, доцільно за сценаріями, умовно оптимістичним та песимістичним.

Оптимістичний сценарій має місце, якщо аналіз результатів оцінювання своїх військ (наявних сил та засобів) і противника, тобто бойових можливостей, показав їх достатність (за бойовим та чисельним складом) для повного (не нижче потрібного) РЕПр власних військ (об'єкта) та/або ураження БпС об'єктів противника. За таким оптимістичним сценарієм розроблення варіантів дій здійснюється відповідно до завдань, а критерієм їх вибору може бути (за частковими показниками): для РЕБ – максимальний (найбільший, найвищий) ступінь прикриття своїх військ; для БпС – максимальний (найбільший, найвищий) ступінь ураження військ (противника).

За відсутності умов оптимістичного сценарію, визначається потреба розроблення варіантів дій щодо виконання поставлених завдань за песимістичним сценарієм. Пропонуємо не розглядати песимістичний сценарій, як прогнозовано найгіршу сукупність, а як такий, що потребує варіантів, що найбільш повно враховують позитивні моменти й дозволяють знизити негативний вплив небажаних факторів і умов загальної тактичної та радіоелектронної обстановки. У такому разі розроблення варіантів дій залежить від спроможностей.

Звісно, таке розділення сценаріїв має формальний характер, але сприяє розробленню можливих варіантів дій та вибору з-поміж них як мінімум двох найбільш раціональних – доцільних і несуперечливих.

У цьому разі будемо так розуміти терміни:

можливий варіант – такий порядок дій наявних сил і засобів, що прогнозовано приведе до певного ступеня виконання цільового завдання;

раціональний варіант – такий можливий варіант, який на визначений прогнозований час його реалізації є оптимальним (за визначеним критерієм оптимальності);

доцільний варіант відповідає загальному плану (замислу) бою (бойових дій);

несуперечливий варіант узгоджується зі змінами обстановки та плану бою (бойових дій).

Пропонуємо варіант оцінювання (планування зони) прикриття об'єкта з урахуванням того, що:

ударний засіб (ЗПН), що здійснює вихід на об'єкт, у системі керування має канал ГСНС та ІНС (або інші);

у системі прикриття об'єкта є підсистема засобів РЕБ, що здійснюють подавлення каналів ГСНС;

у разі правильної (ефективної) побудови підсистеми РЕБ та подавлення бортових засобів каналів ГСНС, ЗПН здійснює наведення (ближнє) лише за даними ІНС, що (залежно від ступеня її вдосконалення) зменшує ймовірність ураження об'єкта за рахунок накопичення помилок визначення власних координат та швидкості їх зміни.

Розглянемо приклад прогнозування дій екіпажу БпЛА для завдання ударів по цілі та, навпаки, збереження об'єкта за рахунок його РЕПр силами та засобами РЕБ.

Об'єкт (бойова позиція, опорний пункт) знаходиться в тактичній ланці управління, тому, як було зазначено раніше в [17], його доцільно формалізувати площиною, обмеженою колом. Радіус кола, що описує об'єкт, розраховуємо відповідно до лінійних розмірів. Оскільки в [17] було надано порядок його визначення, то в цій статті наведемо лише приклад:  $R_1 = 100$  м;  $R_2 = 50$  м;  $R_3 = 25$  м.

Необхідно визначити СКВ  $\sigma$  СН БпЛА (ударного засобу), за яким прогнозовано виникає подія:

влучання в об'єкт (імовірність ураження достатньо висока);

та, навпаки, невлучання в ціль – збереження об'єкта (імовірність ураження низька).

Обираємо модель похибки, виходячи з того, що для кругових похибок в основному застосовують двовимірний нормальний розподіл із параметром  $\sigma$ .

Розглянемо логіку моделі.

1. Моделюємо похибку наведення як двовимірний нормальний розподіл із параметром  $\sigma$  [18].

2. Враховуємо формулу ймовірності того, що точка падіння потрапить у коло радіусом  $R$ , що опишемо таким виразом:

$$P_{\text{попад}} = 1 - e^{-\frac{R_{\text{об'єк}}^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (1)$$

а ймовірність непотрапляння (тобто збереження об'єкта) – у такий спосіб:

$$P_{\text{пром}} = 1 - P_{\text{попад}} = e^{-\frac{R_{\text{об'єк}}^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (2)$$

де  $P_{\text{попад}}$  – імовірність потрапляння;

$P_{\text{пром}}$  – імовірність непотрапляння;

$R_{\text{об'єк}}$  – радіус цілі (об'єкта);

$\sigma$  – СКП системи.

Розраховуємо можливі ймовірності за певними СКП. Результати обчислень (див. табл. 1) наведено у відсотках успішності виконання ураження або збереження об'єктів у заданих радіусах.

Таблиця 1

Успішність виконання ураження або збереження об'єктів у заданих радіусах

СКП $\sigma$ , м	Ураження $R_1 = 100$ м	Збереження $R_1 = 100$ м	Ураження $R_2 = 50$ м	Збереження $R_2 = 50$ м	Ураження $R_3 = 25$ м	Збереження $R_3 = 25$ м
30	99,6% (+)	0,4% (-)	70,7%	29,3% (!)	39,4% (!)	60,6% (+)
50	86,5% (+)	13,5% (-)	39,4% (!)	60,6% (+)	11,8% (!)	88,2% (+)
70	64,0% (!)	36,0% (!)	22,7%	77,3% (+)	5,4% (-)	94,6% (+)
85	49,9% (!)	50,1% (!)	16,2% (-)	83,8% (+)	3,1% (-)	96,9% (+)
100	39,4% (-)	60,6% (+)	11,8% (-)	88,2% (+)	1,8% (-)	98,2% (+)
150	19,9% (-)	80,1% (+)	5,4% (-)	94,6% (+)	0,5% (-)	99,5% (+)
200	11,8% (-)	88,2% (+)	3,1% (-)	96,9% (+)	0,3% (-)	99,7% (+)
300	5,4% (-)	94,6% (+)	1,4% (-)	98,6% (+)	0,1% (-)	99,9% (+)

**Примітка.** (+) – висока ймовірність ураження (понад ~50%); (!) – середня ймовірність (близько 10–50%); (-) – дуже низька ймовірність (менше 10%).

Отримано результати, що підтверджують і фактично демонструють зв'язок розмірів об'єктів з успішністю виконання завдань з ураження, наприклад, ударних БпЛА з ГСНС, а також із прикриття засобами РЕБ – подавлення каналів ГСНС, наприклад, ударних БпЛА, за рахунок чого можна досягнути збільшення СКП.

Для того, щоб уражати об'єкт, потрібно зменшувати  $\sigma$ : для гарантованого ураження ( $\geq 90\%$ ) цілі радіусом 100 м потрібно  $\sigma \leq 47$  м; для цілі радіусом 50 м – ще менше,  $\sigma \leq 23$  м.

Для того, щоб зберегти об'єкт, необхідно, навпаки, збільшувати  $\sigma$ : для цілі радіусом 100 м, у разі  $\sigma \geq 200$  м, шанс збереження становить понад 88%; для цілі радіусом 50 м, якщо  $\sigma \geq 100$  м, шанс збереження – понад 88%.

3. Для визначення потрібної СКП перетворюємо формули (1)–(2) та отримуємо

$$\sigma = \sqrt{\frac{R_{obj}^2}{2 \cdot \ln(1 - P_{попад})}} \quad (3)$$

Результати розрахунків (див. табл. 2) наведено для об'єктів  $R_1 = 100$  м;  $R_2 = 50$  м;  $R_3 = 25$  м.

*Таблиця 2*

Зведена таблиця потрібних СКП, що забезпечують задані ймовірності  
(для об'єктів  $R_1 = 100$  м;  $R_2 = 50$  м;  $R_3 = 25$  м)

$P_{попад}$	$P_{пром}$	$\ln(1 - P_{попад})$	$\sigma$ , м ( $R_1 = 100$ м)	$\sigma$ , м ( $R_2 = 50$ м)	$\sigma$ , м ( $R_3 = 25$ м)
0,1	0,9	-0,105	218,0	109,0	54,5
0,3	0,7	-0,357	118,0	59,0	29,5
0,5	0,5	-0,693	85,0	42,5	21,2
0,7	0,3	-1,204	64,4	32,2	16,1
0,9	0,1	-2,303	47,0	23,5	11,8

Отримані дані підтверджують прогнозовані результати виконання завдань (як силами та засобами РЕБ, так і БпС) по заданих об'єктах. Реалізація таких можливостей потребує планування та виконання комплексу організаційно-технічних заходів і тактичних прийомів.

Дотримуємося концепції ефективності прикриття – цільової ідеї: застосування засобів РЕБ збільшує навігаційну похибку платформи у зоні подавлення (оскільки канали ГСНС не працюють, то вона функціонує за інерціальної складової). Тому, чим більший час у зоні та інтенсивніше подавлення, тим вищі значення показників відхилення (метрики) (див. табл. 2), тим меншою є ймовірність ураження та, відповідно, вищою ймовірність неураження (збереження об'єкта), тобто ефективніше прикриття.

Дослідження передбачає розроблення аналітичної (неопераційної) методики вимірювання того, наскільки РЕПр засобами РЕБ (подавлення ГСНС) збільшує за часом помилку  $\sigma(t)$  порівняно з базовою  $\sigma_0$  та підвищує ймовірність промаху або знижує точність наведення через навігаційні спотворення.

Крок (блок) 1. Розрахунок базової (вихідної) ймовірності промаху (без РЕБ):

$$P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0) = \exp\left(-\frac{R^2}{2 \cdot \sigma_0^2}\right), \quad (4)$$

де  $P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0)$  – базова ймовірність промаху;

$R$  – радіус цілі (зона ураження);

$\sigma_0$  – ізотропна СКП до подавлення.

Крок (блок) 2. Порівняння базової (вихідної) ймовірності промаху із цільовою (заданою, потрібною) ймовірністю промаху  $P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$ :

$P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0) \geq P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$  – додаткових заходів не потрібно;

$P_{\text{пром}}^{(0)}(R, \sigma_0) < P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$  – додаткові заходи РЕБ потрібні.

Крок (блок) 3. Приймаємо обмеження, що цільової (заданої, потрібної) ймовірності промаху  $P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$  можна (потрібно) досягнути виконанням заходів РЕБ щодо своєчасного та достатнього за часом ( $t$ ) подавлення каналів ГСНС, а помилка ІНС наведення БПЛА  $\sigma(t)$  забезпечить досягнення  $P_{\text{пром}}^{(\text{РЕБ})} \geq P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})}$ .

Ймовірність промаху з РЕБ визначаємо в такій спосіб:

$$P_{\text{пром}}^{(\text{РЕБ})}(r, \sigma(t)) = \exp\left(-\frac{R^2}{2 \cdot \sigma^2(t)}\right), \quad (5)$$

де  $r$  – радіальна відстань, використовується як параметр для обрахунку області;

$\sigma(t)$  визначає обрану модель дрейфу ІНС (лінійна / дифузійна / поліноміальна).

Крок (блок) 4. Приймаємо, що модель дрейфу ІНС лінійна:  $\sigma(t) = \sigma_0 + k \cdot t$  (може бути прийнята поліноміальна  $\sigma(t) = \sqrt{\sigma_0^2 + \gamma \cdot t + \delta \cdot t^2}$ , де  $k$  – коефіцієнт інтенсивності;  $\gamma$  – лінійний коефіцієнт зростання (зміни) дисперсії у часі  $t$ ;  $\delta$  – квадратичний коефіцієнт прискорення зміни дисперсії). Тоді  $\sigma^{(\text{потрібно})} = \sigma_0 + k \cdot t$ , розраховуємо її за формулою

$$\sigma^{(\text{потрібно})} = \frac{R}{\sqrt{2 \cdot (-\ln P_{\text{пром}}^{(\text{потрібно})})}}. \quad (6)$$

Крок (блок) 5. Знаючи характеристики БПЛА ( $V$ ) та його ІНС ( $\sigma_0, k$ ), підставляємо у формулу для лінійної моделі дрейфу  $k \cdot t = \sigma^{(\text{потрібно})} - \sigma_0$ , тоді розраховуємо потрібний час  $t = \frac{\sigma^{(\text{потрібно})} - \sigma_0}{k}$  і знайдемо  $D \approx V \cdot t = R^{(\text{потрібно})}$  – радіус зони РПр, потрібну товщину кільця прикриття.

Крок (блок) 6. Розрахунок потрібної площі прикриття  $S^{(\text{потрібно})} = \pi \cdot R^{(\text{потрібно})^2}$ . Знаючи характеристики засобів РЕБ (площу зони відповідного засобу ( $S^{(\text{РЕБ}1)}$ ), знайдемо потрібну кількість засобів РЕБ  $N_{\text{РЕБ}} = \frac{S^{(\text{потрібно})}}{S^{(\text{РЕБ}1)}}$ .

Крок (блок) 7. Визначаємо приріст ймовірності промаху:  $\Delta P_{\text{пром}} = P_{\text{пром}}^{(\text{РЕБ})} - P_{\text{пром}}^{(0)}$ .

Крок (блок) 8. Розраховуємо ефективність прикриття (узагальнено):

$$\varepsilon = \langle \Delta P_{\text{пром}} \rangle \cdot A \cdot C,$$

де  $A$  – показник доступності, який характеризує, наскільки реально можна застосувати засоби РЕБ у конкретному сценарії. Його можна визначити як частку часу працездатності, наприклад РЕБ ( $T_{\text{пр}}$ ), у загальному часі сценарію ( $T_{\text{сц}}$ ), що моделюється в такі фактори доступності: наявність потрібних систем у зоні операцій; технічна справність і готовність до роботи; логістичні та енергетичні обмеження; регуляторні чи командні дозволи на використання, а саме:

$$A = \frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{сц}}}.$$

Показник суцільності покриття зоною РПР потрібної площі земної поверхні  $C$ , що характеризує, наскільки рівномірно та безперервно зона дії засобів РЕБ охоплює простір (радіус, сектор, частотний діапазон), можна визначити як частку площі земної поверхні, на якій виконуються вимоги до енергетики сигналу (енергетики, кратності) засобів РЕБ ( $S_{\text{нокр}}$ ) у заданій площі для покриття ( $S_{\text{зад}}$ ):

$$C = \frac{S_{\text{нокр}}}{S_{\text{зад}}}.$$

Показник  $C$  моделюється у такі фактори суцільності: геометрія розташування засобів (радіус дії, перекриття зон); щільність сигналу та відсутність “мертвих зон”; стійкість до змін середовища.

Агрегація за сценаріями для узагальнення їх результатів (моделей, прогнозів чи варіантів розвитку подій) у єдину систему для отримання інтегрованої оцінки передбачає усереднення  $\Delta P_{\text{пром}}$  за траєкторіями / курсами / швидкостями. При цьому необхідно зважати на доступність РЕБ (високий рівень  $A$  означає, що РЕБ можна швидко й ефективно застосувати; низький, що засоби є, але їх використання обмежене) та суцільність покриття ( $C$ ).

*Крок (блок) 9.* Особа, що приймає рішення в тактичній ланці управління (разом із фахівцями РЕБ та БпС) проводить:

пошук можливих варіантів взаємного розташування елементів БпС, потрібного для виконання завдань з ураження, і зразків техніки РЕБ для РЕПр;

визначення потужностей сигналу ГСНС та перешкод на приймальних антенах БпЛА за технічними характеристиками відповідних передавачів і антенних систем;

розрахунок співвідношення сигналів каналів ГСНС та перешкод на приймальних антенах БпЛА (коефіцієнтів управління та подавлення);

встановлення можливості реалізації потрібних значень показників просторових характеристик БпС та зразка техніки РЕБ (РЕПр) шляхом порівняння отриманих коефіцієнтів управління та подавлення з урахуванням обов’язкових (визначених, потрібних, встановлених) для цього тактичного епізоду коефіцієнтів;

порогову перевірку: чи досягаємо цільового значення ймовірності ( $P_{\text{miss}}$ ;  $P_{\text{hit}}$ ) або метрики у встановлених для прикриття зоні та часі, якщо ні, то потрібно коригувати  $D$ ,  $R$

(потужність / частотний план РЕБ) або накладати додаткові обмеження й розглядати песимістичні варіанти.

Слід зауважити, що потрібно врахувати такі примітки щодо коректності запропонованої моделі похибок навігації ударних БпС і застосування підходу до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта:

по-перше, ця модель є концептуальною, тобто абстрактним узагальненням поглядів авторів на предметну область сучасної збройної боротьби щодо навігаційного протиборства, а також своєрідним каркасом для подальшого моделювання й аналізу;

по-друге, коефіцієнти моделі потрібно брати з надійних даних щодо класу ІНС інерціальних вимірювальних пристроїв кожної платформи БпС, оскільки результати дуже чутливі до значень  $\sigma_0, V, k, \gamma, \delta$ ;

по-третє, за межами цього дослідження залишаються питання анізотропії помилок ІНС, які характеризуються різними дисперсіями похибок за осями ( $\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$ ), що пов'язано з конструктивними особливостями інерціальних вимірювальних пристроїв (різна чутливість акселерометрів та гіроскопів за осями). Це зумовлює необхідність розгляду поліноміальної моделі зростання похибки, значення якої можуть істотно відрізнятися від розрахованих за лінійною моделлю. Це, у свою чергу, потребує зважених рішень, коли вимоги до радіуса прикриття різко розходяться: лінійна модель дає нижній поріг (десятки кілометрів), а поліноміальна – верхню межу (сотні – тисячі кілометрів). Ця потреба спричиняє нову проблему: не створювати нереалістичні зони, а спроектувати стійке, гнучке (за сценарієм) прикриття;

по-четверте, траєкторний вплив критично важливий, оскільки час у зоні може різко змінюватися залежно від курсу та профілю швидкості, наприклад: ЗПН можуть атакувати об'єкт на більшій, ніж крейсерська, швидкості та з різким зменшенням висоти (БпЛА типу Shaded атакує об'єкт із такими значеннями:  $V = 300$  км/год;  $D = 1,5-3$  км;  $H = 0,2-1$  км);

по-п'яте, цій підхід демонструє можливість оцінювання ефективності сил і засобів РЕБ та БпС із використанням імовірнісних метрик (імовірностей) влучання або промаху (збереження), що залежать від розмірів та якості зон прикриття об'єктів, і не містить інструкцій щодо застосування засобів або параметрів впливу.

**Висновки.** У результаті дослідження розроблено підхід до оцінювання ефективності РЕПр об'єкта засобами РЕБ за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС, який може бути підґрунтям для розв'язання проблеми планування застосування таких засобів в умовах навігаційного протиборства.

Запропонований зміст оцінювання РЕПр об'єкта за концептуальною моделлю похибок навігації ударних БпС відповідає оцінюванню протиставних можливостей засобів БпС та РЕБ в умовах навігаційної боротьби та не викривляє оперативного тактичного змісту бойових тактичних епізодів їх застосування в умовах різних сценаріїв. Його можна взяти за основу під час розроблення складних методик, які містять інструкційні положення з планування дій засобів (зразків, комплексів, систем), що розглядаються.

На думку авторів, запропонований матеріал може бути використаний фахівцями тактичного рівня, які безпосередньо застосовують засоби, що мають у складі компоненти

навігаційних систем, або борються з такими, а також проводять розрахунки (використовують результати), для виконання завдань РЕПр або ураження об'єктів.

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Webb F. H. Error Analysis and Probability Models in Navigation Systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 412 p.
2. Papp Z., Rožnjik A. A Method for Approximating Circular Error Probable // Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_3)
3. Zheng T., Xu A., Xu X., Liu M. Modeling and Compensation of Inertial Sensor Errors in Measurement Systems // Electronics. 2023. Vol. 12. 2458. <https://doi.org/10.3390/electronics12112458>
4. Karamat T. et al. Drift and Error Sources in Strapdown Inertial Navigation Systems // The Journal of Navigation. 2012. Vol. 65, Iss. 3. P. 421–438.
5. IEEE Standard for Inertial Sensor Performance Evaluation. IEEE Std 1293-2018. New York, 2018. 15 p. URL: <https://www.standards-global.com/wp-content/uploads/pdfs/preview/2015631> (last accessed: 05.02.2026).
6. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, Chris G. Bartone. Inertial Navigation Error Analysis // Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley, 2020. P. 419–459. <https://doi.org/10.1002/9781119547860.ch11>
7. GuideNav Consortium. INS Error Models and Practical Compensation Techniques. NATO Technical Report. Brussels : NATO, 2019. P. 20. URL: <https://guidenav.com/blog/error-sources-and-compensation-techniques-in-inertial-navigation-systems/> (last accessed: 01.03.2026).
8. Advances in INS drift modeling // IEEE Aerospace Conference Proceedings. New York : IEEE, 2021. P. 713. <https://www.proceedings.com/content/059/059160webtoc.pdf> (last accessed: 10.02.2026).
9. DJI Mavic 3 RTK User Manual. Shenzhen : DJI, 2024. P. 90. URL: [https://dl.djicdn.com/downloads/DJI\\_Mavic\\_3/202406UM/DJI\\_Mavic\\_3\\_User\\_Manual\\_v2.3\\_en.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3/202406UM/DJI_Mavic_3_User_Manual_v2.3_en.pdf) (last accessed: 09.03.2026).
10. Accuracy of GNSS and RTK in Modern UAVs // Defense Express. Kyiv, 2024. URL: [https://defence-ua.com/news/scho\\_daje\\_rosijanam\\_nova\\_sistema\\_navigatsiji\\_v\\_shahedah\\_i\\_chi\\_oznachaje\\_tse\\_bezporadnist\\_reb-17202.html](https://defence-ua.com/news/scho_daje_rosijanam_nova_sistema_navigatsiji_v_shahedah_i_chi_oznachaje_tse_bezporadnist_reb-17202.html) (last accessed: 15.02.2026).
11. GNSS Vulnerabilities and RTK Applications in UAVs // NV. Kyiv, 2024. URL: <https://english.nv.ua/nation/defense-express-debunks-russian-claims-about-upgraded-unstoppable-shahed-drones-50514896.html> (last accessed: 09.03.2026).
12. DJI Enterprise. RTK Technology in Civil and Military UAVs. Shenzhen : DJI, 2024. URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk> (last accessed: 06.02.2026).
13. Electronic Warfare Doctrine and Standards. NATO STANAG 4624. Brussels : NATO Standardization Office, 2020. 115 p. URL: [https://edocs.nps.edu/dodpubs/topic/jointpubs/JP3/JP3\\_13\\_1\\_070125.pdf](https://edocs.nps.edu/dodpubs/topic/jointpubs/JP3/JP3_13_1_070125.pdf) (last accessed: 01.03.2026).

14. ISO/IEC 18305:2021. Test Methods for Navigation and Positioning Performance. Geneva : International Organization for Standardization, 2021. 15 p. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62090/5fe82bb92ecd49bea5144798971e7824/ISO-IEC-18305-2016.pdf> (last accessed: 02.02.2026).
15. Performance Testing of Positioning, Navigation, and Timing Systems. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2022. 85 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=9304974> (last accessed: 05.02.2026).
16. Як працює РЕБ: принципи, механізми та бойове застосування. URL: <https://www.fair.org.ua/yak-praczyuye-reb-pryncypy-mehanizmy-ta-bojove-zastosuvannya/> (дата звернення: 05.03.2026).
17. Іщенко Д. А., Стрінада В. В. Формування задуму ударного безпілотного авіаційного комплексу з урахуванням прогнозованого радіоелектронного прикриття об'єкта від ударів із повітря // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 28 (I). С. 177–189. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.15>
18. Михайленко С. В., Свіцова Є. В., Янцевич А. А Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. 2-ге вид., випр. Харків : Вид-во НУА, 2022. 180 с.
19. Костюк О. В., Костюк В. О. Теорія похибок та обробка результатів вимірювань. Київ : КНУ, 2018. 312 с.

*Стаття надійшла до редакції 30.04.2026.*

*Прийнято до друку 15.05.2026.*

*Дата публікації 30.06.2026.*

## REFERENCES

1. Webb, F. H. (2012). *Error Analysis and Probability Models in Navigation Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
2. Papp, Z., & Rožnjik, A. A (n. d.). Method for Approximating Circular Error Probable. *Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_3)
3. Zheng, T., Xu, A., Xu, X., & Liu, M. (2023). Modeling and Compensation of Inertial Sensor Errors in Measurement Systems. *Electronics*, 12, 2458. <https://doi.org/10.3390/electronics12112458>
4. Karamat, T., et al. (2012). Drift and Error Sources in Strapdown Inertial Navigation Systems. *The Journal of Navigation*, 65, 3, 421–438.
5. *IEEE Standard for Inertial Sensor Performance Evaluation. IEEE Std 1293-2018*. (2018). New York Retrieved from <https://www.standards-global.com/wp-content/uploads/pdfs/preview/2015631>
6. Mohinder, S. Grewal, Angus, P. Andrews, & Chris, G. Bartone. (2020). Inertial Navigation Error Analysis. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119547860.ch11>

7. *GuideNav Consortium. INS Error Models and Practical Compensation Techniques. NATO Technical Report.* (2019). Brussels: NATO. Retrived from <https://guidenav.com/blog/error-sources-and-compensation-techniques-in-inertial-navigation-systems/>
8. *Advances in INS Drift Modeling.* (2021). In *IEEE Aerospace Conference Proceedings.* New York. Retrived from <https://www.proceedings.com/content/059/059160webtoc.pdf>
9. *DJI Mavic 3 RTK User Manual.* (2024). Shenzhen. Retrived from [https://dl.djicdn.com/downloads/DJI\\_Mavic\\_3/202406UM/DJI\\_Mavic\\_3\\_User\\_Manual\\_v2.3\\_en.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3/202406UM/DJI_Mavic_3_User_Manual_v2.3_en.pdf)
10. *Accuracy of GNSS and RTK in Modern UAVs.* (2024). *Defense Express.* Kyiv. Retrived from [https://defence-ua.com/news/scho\\_daje\\_rosijanam\\_nova\\_sistema\\_navigatsiji\\_v\\_shahedah\\_i\\_chi\\_oznachaje\\_tse\\_bezporadnist\\_reb-17202.html](https://defence-ua.com/news/scho_daje_rosijanam_nova_sistema_navigatsiji_v_shahedah_i_chi_oznachaje_tse_bezporadnist_reb-17202.html)
11. *GNSS Vulnerabilities and RTK Applications in UAVs.* (2024). Kyiv. Retrived from <https://english.nv.ua/nation/defense-express-debunks-russian-claims-about-upgraded-unstoppable-shahed-drones-50514896.html>
12. *DJI Enterprise. RTK Technology in Civil and Military UAVs.* (2024). Shenzhen. Retrived from <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk>
13. *Electronic Warfare Doctrine and Standards. NATO STANAG 4624.* (2020). Brussels: NATO Standardization Office. Retrived from [https://edocs.nps.edu/dodpubs/topic/jointpubs/JP3/JP3\\_13\\_1\\_070125.pdf](https://edocs.nps.edu/dodpubs/topic/jointpubs/JP3/JP3_13_1_070125.pdf)
14. *ISO/IEC 18305:2021. Test Methods for Navigation and Positioning Performance.* (2021). Geneva: International Organization for Standardization. Retrived from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62090/5fe82bb92ecd49bea5144798971e7824/ISO-IEC-18305-2016.pdf>
15. *Performance Testing of Positioning, Navigation, and Timing Systems.* (2022). Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology. Retrived from <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=9304974>
16. *Yak pratsiue REB: pryntsyty, mekhanizmy ta boiove zastosuvannia [How Electronic Warfare Works: Principles, Mechanisms and Combat Applications].* (n. d.). <https://www.fair.org.ua/yak-praczyuyue-reb-prynczypy-mehanizmy-ta-bojove-zastosuvannya/> [in Ukrainian].
17. *Ishchenko, D. A., Strinada, V. V. (2025). Formuvannia zadumu udarnoho BpAK z urakhuvanniam prohnzovanoho radioelektronnoho prykryttia obiekta vid udariv iz povitria [Forming the Concept of Strike Unmanned Aerial Complex Taking into Account the Forecasted Radioelectronic Coverage of the Object from Air Strikes]. Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute], 28 (I), 177–189. https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.15 Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].*
18. *Mykhailenko, S. V., Svishchova, Ye. V., & Yantsevych, A. A. (2022). Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka: navch. posib. [Probability Theory and Mathematical Statistics: textbook].* Kharkiv [in Ukrainian].
19. *Kostiuk, O. V., & Kostiuk, V. O. (2018). Teoriia pokhybok ta obrobka rezultativ vymiriuvan [Error Theory and Processing of Measurement Results].* Kyiv [in Ukrainian].

**D. A. Ishchenko, V. V. Strinada**

**APPROACH TO ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF RADIO-ELECTRONIC COVERAGE OF AN OBJECT BASED ON A CONCEPTUAL MODEL OF NAVIGATION ERRORS IN STRIKE DRONE SYSTEMS**

*The article examines the effectiveness of electronic countermeasures for an object, carried out using electronic warfare tools, as a measure of how much they reduce the effectiveness of strikes by unmanned systems. This is considered as the degree to which these systems can execute precision strikes on targets. These capabilities of unmanned systems directly depend on the use of various navigation systems, primarily inertial ones. Unmanned systems operate autonomously, but they are integrated with navigation systems that work with external sources of navigation information. Maintaining guidance accuracy involves periodically correcting the data of inertial navigation systems with information obtained from onboard radio-electronic equipment of global satellite navigation system channels. If such correction isn't possible, the number of errors in determining the vehicle's own location and their changes over time increases, which worsens the navigation of unmanned systems when targeting programmed objects. An increase in the root mean square errors in the navigation systems of unmanned vehicles, proportional to the duration of global satellite navigation system channel jamming, reduces the likelihood of hitting the target and, accordingly, their effectiveness.*

*In modern combat operations, the widespread use of unmanned systems creates complex challenges for electronic warfare forces and equipment, particularly when it comes to jamming the channels of global satellite navigation systems for air attack assets. A conceptual model of navigation errors has been proposed, combining classic accuracy metrics (circular error probable and root mean square error in distance) with practical models of inertial navigation system error growth under the influence of electronic warfare tools and interference on the onboard electronic systems of global satellite navigation channels for air attack assets. This approach allows evaluating the effectiveness of an object's electronic shielding not just based on error parameters, but also on indicators determined by electronic warfare factors. It makes it possible to adapt the assessment system to real conditions and provides a basis for multi-level resource planning in a system that counters drone threats.*

**Keywords:** *unmanned system; global satellite navigation system; inertial navigation system; air strike means; navigation system; circular probable deviation; navigation error; root mean square deviation; electronic warfare; effectiveness of cover.*