**НАУКОВО-ДОСЛІДНА ГРУПА:**

**Трофимов Іван Миколайович**
канд. техн. наук, ст. дослід., професор кафедри тактики радіотехнічних військ
*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна*

**Гризо Андрій Аркадійович**
канд. техн. наук, доцент, начальник науково-дослідної лабораторії
*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна*

**Гурєєв Іван Володимирович**
д-р.філос, начальник науково-дослідного відділу
*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна*

**Маляренко Олександр Сергійович**
канд. техн. наук, с.н.с., провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу
*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна*

# ПОРУШЕННЯ ЦИКЛУ OODA ПРОТИВНИКА У СИСТЕМІ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЖИВУЧОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

***Анотація.*** *Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України підтвердила вразливість радіолокаційних станцій (РЛС) радіотехнічних військ (РТВ) до сучасних розвідувально-ударних комплексів (РУК), що функціонують за циклом OODA. Розроблено математичну модель інтегральної ймовірності ураження РЛС та обґрунтовано метод комплексного підвищення їх живучості. Результати моделювання підтвердили ефективність узгодженого застосування комплексу заходів, що забезпечує істотне зниження ймовірності ураження РЛС. Результати можуть бути використані для обґрунтування заходів забезпечення живучості РЛС РТВ.*

З початку широкомасштабної збройної агресії російської федерації проти України РТВ ПС ЗС України функціонують в умовах систематичного застосування противником РУК, до складу яких входять розвідувальні безпілотні літальні апарати (БпЛА), засоби радіотехнічної та оптико-електронної розвідки, пункти управління й ударні БпЛА типу “Shahed-136” (“Герань-2”) [1, 2, 3]. Ураження радіолокаційних станцій (РЛС) РТВ призводить до зниження ефективності ведення радіолокаційної розвідки, порушення суцільності радіолокаційного поля та створення сприятливих умов для прихованого застосування засобів повітряного нападу [4].

Аналіз сучасних підходів до забезпечення живучості РЛС свідчить, що заходи пасивного захисту, маскування, інженерного обладнання позицій і

оперативного маневру переважно розглядаються як окремі напрямки, без урахування їх комплексного впливу на розвідувально-ударний цикл противника. Водночас зазначений цикл відповідає логіці петлі прийняття рішень OODA (Observe – Orient – Decide – Act), порушення окремих етапів якої здатне істотно знизити ефективність функціонування РУК [5, 6]. Зазначене обумовлює актуальність дослідження можливостей порушення циклу OODA противника як складової комплексу заходів підвищення живучості РЛС.

Метою роботи є розроблення наукового підходу до порушення розвідувально-ударного циклу OODA противника шляхом математичного моделювання процесів виявлення, ідентифікації, прийняття рішення та ураження РЛС РТВ під час застосування ударних БпЛА типу “Shahed-136” (“Герань-2”).

Наукова новизна роботи полягає у формалізації процесу функціонування розвідувально-ударного циклу OODA противника у вигляді математичної моделі, що забезпечує кількісне оцінювання ефективності одночасного застосування заходів підвищення живучості РЛС РТВ. Використання математичного моделювання як інструменту дослідження відповідає сучасним підходам до аналізу складних військових систем та оцінювання ефективності альтернативних варіантів їх функціонування [7].

Для досягнення поставленої мети побудовано математичну модель, яка описує процес реалізації розвідувально-ударного циклу OODA противника та дає змогу оцінити вплив окремих заходів на ймовірність ураження РЛС. Інтегральну ймовірність ураження РЛС $P_{ур}$ подано як добуток ймовірностей реалізації окремих етапів циклу OODA: Observe (виявлення), Orient (ідентифікація), Decide (прийняття рішення) та Act (ураження цілі) [5]:

$$\mathrm{P}_{\text{ур}} = \mathrm{P}_{\text{вияв}} \cdot \mathrm{P}_{\text{іден}} \cdot \mathrm{P}_{\text{ріш}} \cdot \mathrm{P}_{\text{атаки}}, \quad (1)$$

*де:*

*$P_{вияв}$ – ймовірність виявлення РЛС засобами технічної розвідки на етапі виявлення;*

*$P_{іден}$ – ймовірність правильної класифікації об’єкта як справжньої РЛС на етапі ідентифікації;*

*$P_{ріш}$ – ймовірність прийняття рішення на застосування ударних БпЛА до моменту зміни позиції РЛС на етапі прийняття рішення;*

*$P_{атаки}$ – ймовірність ураження РЛС ударним БпЛА типу “Shahed-136” (“Герань-2”) на етапі безпосереднього ураження цілі.*

Під час побудови моделі прийнято припущення про незалежність каналів технічної розвідки та ударних БпЛА противника, сталість режимів функціонування РЛС протягом часу її перебування на позиції та відсутність впливу засобів радіоелектронної боротьби.

Ймовірність виявлення РЛС хоча б одним із незалежних каналів технічної розвідки (радіотехнічної (РТР), оптико-електронної (ОЕ) та інфрачервоної (ІЧ) визначається співвідношенням:

$$P_{вияв} = 1 - (1 - P_{РТР}) \cdot (1 - P_{ОЕ}) \cdot (1 - P_{ІЧ}). \quad (2)$$

Ймовірність виявлення РЛС засобами РТР має накопичувальний характер і описується пуассонівським потоком спостережень:

$$P_{РТР} = 1 - e^{-n_r \cdot \lambda_r \cdot T_{поз} \cdot k_{ЕМ}}, \quad (3)$$

*де:*

*$n_r$ – кількість розвідувальних засобів, залучених до одночасного ведення розвідки РЛС;*

*$\lambda_r$ – інтенсивність розвідки (середня кількість "спроб" виявлення РЛС за одиницю часу);*

*$T_{поз}$ – час перебування РЛС на позиції;*

*$k_{EM}$ – коефіцієнт режиму електромагнітного випромінювання (ЕМВ).*

Значення $k_{EM}$ може бути суттєво знижене шляхом використання сигналів з низькою ймовірністю перехоплення (Low Probability of Intercept, LPI), зокрема складномодульованих [8 – 10].

Імовірності виявлення РЛС засобами ОЕ та ІЧ розвідки $P_{OE}$ та $P_{ІЧ}$ прийнято сталими, оскільки вони визначаються демаскуючими ознаками об'єкта, а не тривалістю його перебування на позиції.

Ймовірність правильної ідентифікації справжньої РЛС серед $N_d$ типових хибних позицій (макетів) з коефіцієнтом ефективності $f_d$ ($0 \leq f_d \leq 1$) визначається виразом:

$$P_{іден} = 1/(1 + N_d \cdot f_d). \quad (4)$$

Ймовірність прийняття рішення про застосування ударних засобів до зміни позиції РЛС описується експоненціальним законом:

$$P_{ріш} = 1 - e^{-T_{поз}/T_{ріш}}. \quad (5)$$

*де:*

*$T_{ріш}$ – середній час циклу вироблення рішення, тобто усереднений час від моменту виявлення РЛС до прийняття рішення на її ураження.*

Сумарне середньоквадратичне відхилення точки падіння ударного БпЛА $\sigma_\Sigma$ визначається шляхом квадратичного додавання похибки визначення координат засобами технічної розвідки (з урахуванням $m$ послідовних уточнень) та похибки інерціальної навігаційної системи, яка накопичується пропорційно дальності польоту $L$ з коефіцієнтом $k_{ІНС}$.

Ймовірність ураження РЛС одним ударним БпЛА визначається на основі розподілу Релея з урахуванням ефективного радіуса ураження бойової частини $r_{ур}$ та умовної ймовірності виведення РЛС з ладу $P_ф$, що характеризує ефективність бойової частини за умови її підриву в межах ефективної зони ураження:

$$\mathrm{P}_{\text{атаки},1} = \left(1 - \mathrm{e}^{-\mathrm{r}_{\text{ур}}^2/2\sigma_\Sigma^2}\right) \cdot \mathrm{P}_{\text{ф}}. \quad (6)$$

Для групи з $N_{БпЛА}$ незалежно застосованих ударних БпЛА ймовірність ураження РЛС визначається наступним виразом:

$$\mathrm{P}_{\text{атаки}} = 1 - \left(1 - \mathrm{P}_{\text{атаки},1}\right)^{\mathrm{N}_{\text{БпЛА}}}. \quad (7)$$

На основі запропонованої математичної моделі *(1)–(7)* виконано числовий розрахунок інтегральної ймовірності ураження РЛС для базового варіанта її функціонування без застосування заходів підвищення живучості.

Для числового експерименту прийнято такі вихідні дані: ($n_r$ = 3; $\lambda$ = 0,25 год$^{-1}$; $T_{поз}$ = 6 год; $k_{EM}$ = 1; $P_{OE}$ = 0,7; $P_{ІЧ}$ = 0,5; $N_d$ = 0; $f_d$ = 0; $T_{ріш}$ = 2 год; $L$ = 350 км; $k_{ІНС}$ =0,00005; $m$ = 3; $r_{ур}$ = 30 м; $P_ф$ = 0,8; $N_{БпЛА}$ = 2; $\sigma_\Sigma$ = 21 м. Отримані результати наведено в (табл. 1).

*Таблиця 1*

**Вихідні та розрахункові параметри математичної моделі оцінювання ймовірності ураження РЛС без застосування заходів захисту**

| Етап циклу OODA | Ключові вхідні параметри | Ймовірність етапу |
|---|---|---|
| Виявлення | $n_r$ = 3; $\lambda$ = 0,25 год$^{-1}$; $T_{поз}$ = 6 год; $k_{EM}$ = 1; $P_{OE}$ = 0,7; $P_{ІЧ}$ = 0,5 | $P_{вияв}$ = 0,998 |
| Ідентифікація | $N_d$ = 0; $f_d$ = 0 | $P_{іден}$ = 1 |
| Прийняття рішення | $T_{поз}$ = 6 год; $T_{ріш}$ = 2 год | $P_{ріш}$ = 0,95 |
| Ураження цілі | $L$ = 350 км; $k_{ІНС}$ =0,00005; $m$ = 3; $r_{ур}$ = 30 м; $P_ф$ = 0,8; $N_{БпЛА}$ = 2; $\sigma_\Sigma$ = 21 м | $P_{атаки}$ = 0,75 |
| **Інтегральна ймовірність ураження РЛС** | | **$P_{ур}$ = 0,711** |

*авторська розробка*

Оскільки інтегральна ймовірність ураження РЛС визначається як добуток ймовірностей реалізації окремих етапів циклу OODA *(1)*, порушення функціонування навіть одного з них призводить до мультиплікативного зменшення результуючої ймовірності ураження. На цій основі запропоновано комплексне підвищення живучості РЛС РТВ, яке передбачає узгоджене за метою, часом та умовами застосування п'яти взаємодоповнюючих груп заходів, кожна з яких спрямована на порушення відповідного етапу розвідувально-ударного циклу противника. Зокрема, обмеження режиму електромагнітного випромінювання $k_{EM}$ та комплексне маскування, що зменшує ймовірності оптико-електронного $P_{OE}$ та інфрачервоного $P_{IЧ}$ виявлення, забезпечують зниження ймовірності виявлення $P_{вияв}$ на етапі “Observe”. Розгортання хибних позицій і макетів РЛС $N_d, f_d$ зменшує ймовірність правильної ідентифікації цілі $P_{іден}$ на етапі “Orient”. Скорочення часу перебування РЛС на позиції $T_{поз}$ унаслідок оперативної передислокації одночасно знижує ймовірності виявлення та прийняття рішення щодо ураження $P_{вияв}$ та $P_{ріш}$ на етапах “Observe” та “Decide”. Застосування засобів фізичного (інженерного) захисту, що забезпечують зменшення критичного радіуса ураження $r_{ур}$, приводить до зниження ймовірності ураження $P_{атаки}$ на етапі “Act”.

Для кількісного оцінювання ефективності запропонованого методу проведено числовий експеримент відповідно до математичної моделі *(1) – (7)*. На першому етапі вплив кожного із заходів оцінювався окремо відносно базового варіанта (табл. 1), що дало змогу визначити його індивідуальний внесок у підвищення живучості РЛС. На другому етапі виконано інтегральне оцінювання спільного застосування всіх заходів, результати якого наведено в останньому рядку (табл. 2). Як показник ефективності використано ймовірність живучості РЛС, що визначається наступним співвідношенням:

$$P_{\text{жив}} = 1 - P_{\text{ур}}. \tag{8}$$

*Таблиця 2*

**Результати числового розрахунку ймовірності ураження РЛС РТВ**

| Захід захисту | $P_{вияв}$ | $P_{іден}$ | $P_{ріш}$ | $P_{атаки}$ | $P_{ур}$ | $P_{жив}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Відсутні | 0,998 | 1 | 0,95 | 0,75 | 0,711 | 0,289 |
| Обмеження ЕМВ | 0,929 | 1 | 0,95 | 0,75 | 0,662 | 0,338 |
| Комплексне маскування | 0,994 | 1 | 0,95 | 0,75 | 0,708 | 0,292 |
| Хибні позиції, макети РЛС | 0,998 | 0,417 | 0,95 | 0,75 | 0,296 | 0,704 |
| Оперативна передислокація | 0,941 | 1 | 0,777 | 0,75 | 0,548 | 0,452 |
| Фізичний (інженерний) захист | 0,998 | 1 | 0,95 | 0,293 | 0,278 | 0,722 |
| **Усі заходи разом** | **0,615** | **0,417** | **0,777** | **0,293** | **0,058** | **0,942** |

*авторська розробка*

Проведені розрахунки свідчать, що ефективність окремих заходів підвищення живучості РЛС істотно відрізняється залежно від етапу розвідувально-ударного циклу OODA, на який вони впливають. Найбільше зниження інтегральної ймовірності ураження забезпечують інженерний захист ($P_{ур}$ = 0,278) та розгортання хибних позицій ($P_{ур}$ = 0,296), що пояснюється їхнім впливом на етапи з найбільшим потенціалом зменшення відповідних імовірностей у базовому варіанті моделі ($P_{атаки}$ = 0,75) та ($P_{іден}$ = 1 відповідно). Натомість комплексне маскування ($P_{ур}$ = 0,708) і обмеження режиму електромагнітного випромінювання ($P_{ур}$ = 0,662) за ізольованого застосування забезпечують відносно незначний ефект, оскільки впливають лише на окремі канали багатоканальної системи технічної розвідки противника.

Принципово інший результат отримано за узгодженого застосування всіх запропонованих заходів. У цьому випадку ймовірність виявлення РЛС зменшується з 0,998 до 0,615, а інтегральна ймовірність її ураження – з 0,711 до 0,058. Відповідно інтегральна ймовірність живучості РЛС зростає з 0,289 до 0,942, тобто більш ніж утричі порівняно з базовим варіантом. Отримані результати свідчать про наявність синергетичного ефекту, за якого сумісне застосування заходів забезпечує істотно вищу ефективність, ніж їх використання окремо. Це обумовлено узгодженим зниженням імовірностей реалізації всіх етапів циклу OODA, внаслідок чого інтегральна ймовірність ураження зменшується як добуток окремих імовірностей.

Додатково проведене математичне моделювання залежності ймовірності живучості РЛС від тривалості перебування на позиції за різних значень середнього часу циклу вироблення рішення противника $T_{ріш}$ підтвердило стійкість запропонованого підходу в широкому діапазоні умов застосування. Моделювання показало, що комплексне застосування заходів захисту забезпечує стабільне підтримання ймовірності живучості РЛС на рівні близько 0,9 практично незалежно від тривалості перебування станції на позиції, тоді як у базовому варіанті цей показник монотонно зменшується до значення близько 0,25. Це свідчить про те, що узгоджене порушення різних етапів циклу OODA є значно ефективнішим підходом до підвищення живучості РЛС, ніж зниження ймовірності реалізації лише одного з етапів цього циклу.

**Висновки.** Повномасштабна збройна агресія Російської Федерації проти України засвідчила високу вразливість РЛС РТВ до сучасних РУК противника, функціонування яких ґрунтується на реалізації циклу OODA.

Розроблено математичну модель інтегральної ймовірності ураження РЛС як добутку ймовірностей реалізації етапів циклу OODA та обґрунтовано метод комплексного підвищення живучості РЛС, що передбачає узгоджене

застосування обмеження режиму ЕМВ, комплексного маскування, хибних позицій, оперативної передислокації та засобів фізичного захисту.

Результати математичного моделювання підтвердили, що комплексне застосування запропонованих заходів знижує інтегральну ймовірність ураження РЛС з 0,711 до 0,058 та підвищує ймовірність її живучості приблизно утричі порівняно з базовим варіантом. Отриманий ефект досягається завдяки одночасному порушенню різних етапів циклу OODA.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості їх використання під час планування заходів забезпечення живучості радіотехнічних підрозділів, обґрунтування режимів бойового застосування РЛС та оцінювання ефективності сукупності заходів протидії ударним БпЛА.

Перспективним напрямом подальших досліджень є врахування впливу засобів РЕБ, багатоканальних розвідувально-ударних дій противника та застосування методів імітаційного моделювання для оцінювання живучості РЛС в умовах динамічної бойової обстановки.

**Список використаних джерел:**


1. Трофимов І.М., Худов Г.В., Білецький С.С., Гризо А.А. & Гладіщук О.В. (2024) Особливості бойового застосування радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України в ході російсько-української війни. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 2(55), 76–85. Вилучено з: https://doi.org/10.30748/nitps.2024.55.08.
2. Гризо А.А., Костиря О.О., & Трофимов І.М. (2025). Російсько-українська війна як каталізатор змін у європейській системі ППО-ПРО: від американської підтримки до стратегічної автономії. *Міжнародний науковий журнал "Military Science"*, 3(2), 56-77. Вилучено з: https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.2.5.
3. Гризо А.А., Грицаєнко С.А., Трофимов І.М., Костиря О.О., Ковалевська Н. В., & Пономарь А. В. (2026) Уроки операції "Absolute resolve", аналіз критичних вразливостей систем протиповітряної оборони в умовах багатодоменного впливу та напрями мінімізації ризиків. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 2 (28), 7-21. Вилучено з: https://doi.org/ 10.37701/dndivsovt.28.2026.01.
4. Трофимов І.М., Гризо А.А., Маляренко О.С., Рафальський Ю.І. & Пиво М.Ю. (2025). Підвищення живучості засобів радіолокації радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України в умовах дії розвідувально-ударних комплексів противника. *Системи озброєння і військова техніка*, 3(83), 66-79. Вилучено з: https://doi.org/10.30748/soivt.2025.83.09.
5. Boyd, J.R. *The Essence of Winning and Losing* [online]. Maxwell Air Force Base: Air University Press, 2018 [viewed 2026-05-29]. Retrieved from: https://ooda.de/media/john_boyd_-_the_essence_of_winning_and_losing.pdf.
6. Dudush A., Tyutyunnik V., Trofymov I., Bortnovs'kiy S. & BONDARENKO S. (2018) State of the Art and Problems of Defeat of Low, Slow and Small Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Military Technology*, 13(2), 157-171. Retrieved from: https://doi.org/10.3849/aimt.01233.
7. Гризо А.А., Костиря О.О., Трофимов І.М., Нелінь Д.П. & Лук'янчиков А.А. (2026). Аналіз підходів НАТО до системи моделювання та імітації, перспективи їх адаптації й упровадження в Україні. *Міжнародний науковий журнал "Military Science"*, 4(1), 174–196. Вилучено з: https://doi.org/10.62524/msj.2026.4.1.13.
8. Kostyria, O. O. ., Hryzo, A. A., Trofymov, I. M. ., Liashenko, O. I. ., & Biernik, Y. V. (2025). Method for studying the time-shifted mathematical model of a two-fragment signal with nonlinear frequency modulation. *Radio Electronics, Computer Science, Control,* (3), 6–16. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-3-1.
9. Kostyria O. O., Hryzo A. A., Dodukh O. M., Lisohorskyi B. A., & Lukianchykov A. A. (2023). Method of minimization sidelobes level autocorrelation functions of signals with non-linear frequency modulation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 39. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-4-4.
10. Kostyria, O. O., Hryzo A. A., Khudov, H. V., Dodukh, O. M., & Lisohorskyi B. A. (2024). Two-fragment non-linear-frequency modulated signals with roots of quadratic and linear laws frequency changes. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (1), 17. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-2.