

О. В. Росляков, С. А. Горелишев

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ПРОТИДІЇ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТАМ СИЛАМИ ТА ЗАСОБАМИ ВІЙСЬКОВОЇ ЧАСТИНИ З ОХОРОНИ ВАЖЛИВОГО ДЕРЖАВНОГО ОБ'ЄКТА (ЯДЕРНОЇ УСТАНОВКИ)

Подано комплексну трирівневу модель протидії безпілотним літальним апаратам для захисту ядерних установок силами Національної гвардії України. Комплексна модель складається з трьох частин: модель процесу визначення буферної зони, модель виявлення безпілотних літальних апаратів та модель їх знищення та/або нейтралізації. Уперше запропоновано метод розрахунку буферної зони з урахуванням характеристик безпілотних літальних апаратів, часу реагування та зон досяжності мобільних вогневих груп. Обґрунтовано можливість використання бістатичної радіолокації у зоні раннього виявлення цілей. Процес знищення безпілотних літальних апаратів моделювався за допомогою стохастичної системи масового обслуговування типу М/М/п/т з виходом із черги. Результати дослідження дають змогу підвищити ефективність бойового застосування мобільних вогневих груп в умовах обмежених ресурсів та адаптувати систему оборони до сучасних загроз.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, ядерна установка, буферна зона, бістатична радіолокація, мобільні вогневі групи.

Постановка проблеми. У період з 2022 по 2025 рр. в Україні спостерігається стрімке зростання масштабів та інтенсивності застосування ударних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з боку противника. Якщо у 2022 р. атаки дронів-камікадзе мали переважно одиничний характер, то вже у 2024–2025 рр. вони набули масованого, хвильового та комбінованого характеру. Так, за перше півріччя 2025 р. зафіксовано понад 22 500 атак БПЛА типу Shahed-136/Geran-2 та їхніх імітаторів [1], значна частина з яких була спрямована на об'єкти енергетичної і критичної інфраструктури, включно з ядерними установками (рис. 1).

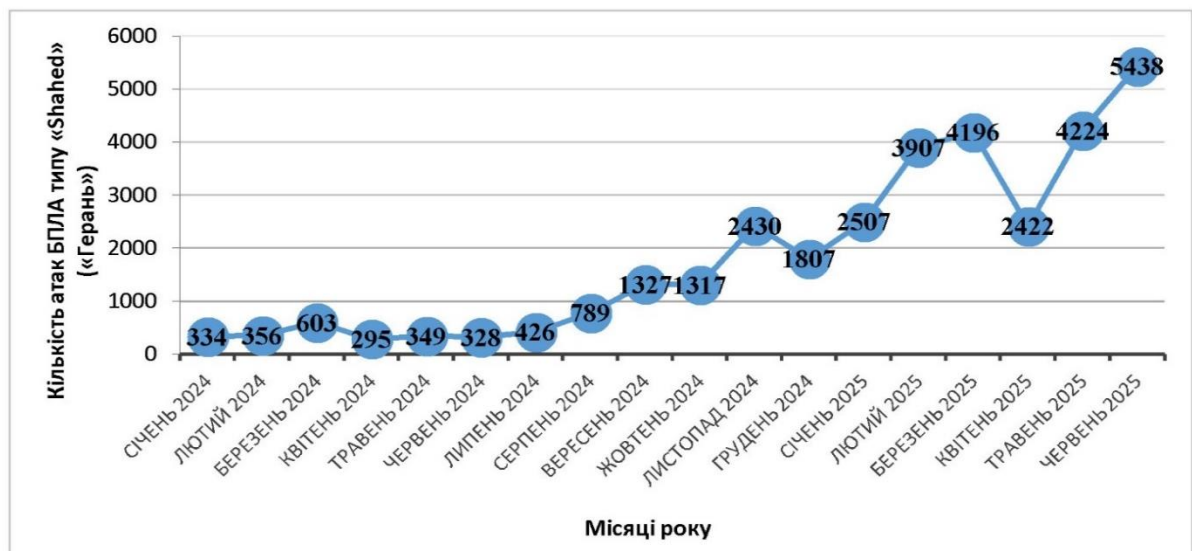


Рисунок 1 – Динаміка атак безпілотними літальними апаратами типу «Shahed» («Герань») (Джерело розроблено авторами на основі [1])

Традиційні підходи до захисту ядерних об'єктів, які базуються на застосуванні стаціонарних засобів виявлення та перехоплення швидкісних повітряних цілей, показали недостатню ефективність проти малорозмірних, малопомітних і маловисотних БПЛА. Показовим є інцидент на Чорнобильській АЕС 14 лютого 2025 р., коли дрон-камікадзе влучив у захисну оболонку Арки нового безпечного конфайнменту, спричинивши пробійну діаметром 6 м і пошкодження кранової системи.

У відповідь на нові загрози було створено мобільні вогневі групи (МВГ), оснащені стрілецькою зброєю, переносними зенітно-ракетними комплексами (ПЗРК), засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ) та засобами виявлення. Однак брак чіткого науково-обґрунтованого підходу до їхнього розміщення, координатії, визначення зони відповідальності та часу реагування призводить до зниження їхньої ефективності. Крім того, відсутність єдиної інтегрованої системи, яка б поєднувала радіолокаційні станції (РЛС), оптико-електронні засоби, засоби РЕБ та МВГ у просторово-часовому контексті, не дає можливості адекватно реагувати на складні, багатовекторні сценарії атак.

Отже, на сьогодні є необхідність перегляду принципів організації системи захисту ядерних установок з урахуванням нових сучасних загроз та обмежень на ресурси щодо їхнього захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найближчими за проблематикою до визначеного напрямку дослідження є публікації [2–8]. У статтях [2, 3] запропоновано модель протидії БПЛА, у якій оцінюються ймовірність їх виявлення, а також за допомогою системи масового обслуговування з очікуванням і покиданням черги ймовірність знищення. Водночас у моделі немає розгляду багаторівневої структури протидії та не враховано динаміку загроз у просторі й часі.

У праці [4] подано математичну модель комплексної протидії безпілотним літальним апаратам на основі теорії Марківських процесів. Модель побудована з використанням моделі масового обслуговування з різнорідними каналами обслуговування, що відображає різноманітність засобів виявлення та ураження БпЛА. Проте ця модель не враховує вплив технічних характеристик безпілотних літальних апаратів, час розгортання та реагування засобів виявлення і вогневого ураження, геопросторові обмеження.

У джерелі [5] основну увагу приділено розробленню системи протидії БПЛА, яка містить підсистеми виявлення (оптичне, акустичне, радіолокаційне, радіомоніторинг), придушення (радіоелектронна боротьба) та управління. Стаття зосереджується на невогневих засобах (придушення та перехоплення управління), але не розглядає інтеграцію з вогневими засобами (зенітні установки, кулемети великого калібру, стрілецька зброя) чи фізичними бар'єрами (сітки, захисні куполи), які є важливими для захисту елементів АЕС від дронів-камікадзе.

У статті [6] розглянуто модель оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з БПЛА на основі ймовірнісного підходу. Незважаючи на високу деталізацію окремих підсистем, модель не враховує просторово-часову динаміку розвитку повітряних загроз та не інтегрує РЕБ у загальну систему оборони об'єкта.

Дослідження [7] детально описує сучасні активні засоби протидії БПЛА, але не проводить оцінки їхньої ефективності.

Праця [8] містить важливий практичний огляд сучасних засобів боротьби з безпілотними літальними апаратами, акцентуючи на їхніх характеристиках та перспективах розвитку, але не пропонує структурованої моделі протидії БПЛА. Немає аналізу інтеграції засобів РЕБ та вогневого ураження з урахуванням їхнього взаємного перекриття зон дії для підвищення ефективності.

Отже, аналіз літературних джерел показав, що питання упровадження комплексного підходу, який поєднує кількісне моделювання, сучасні методи виявлення та адаптивні механізми реагування залежно від типу загроз і сценаріїв розвитку обстановки, а також враховує наявні сили й засоби військових частин, потребує подальшого дослідження.

Метою статті є розроблення комплексної моделі протидії безпілотним літальним апаратам силами та засобами військової частини з охорони важливого державного об'єкта (ядерної установки).

Виклад основного матеріалу. За досвідом бойових дій, система захисту від БПЛА повинна бути комплексною та містити щонайменше три послідовні етапи: виявлення, придушення і знищення цілей [9].

Автори статті пропонують систему протидії БПЛА військової частини з охорони ядерних установок, яка має трирівневу структуру (рис. 2). Перший рівень (10–50 км) передбачає завчасне виявлення цілей за допомогою РЛС, ІЧ-камер, акустичних сенсорів та зовнішніх джерел цілевказання (наприклад, «Віраж планшет», AeroScore). Другий рівень (3–10 км) реалізується засобами РЕБ, зокрема системами придушення GPS/GNSS і каналів управління, а також антидроновими рушницями. Третій рівень (1–3 км) спрямований на гарантоване знищення БПЛА стрілецькою зброєю, зенітними засобами та ПЗРК. Ефективність ураження залежить від точності виявлення, вибору точки вогневого контакту та характеристик засобів ураження.

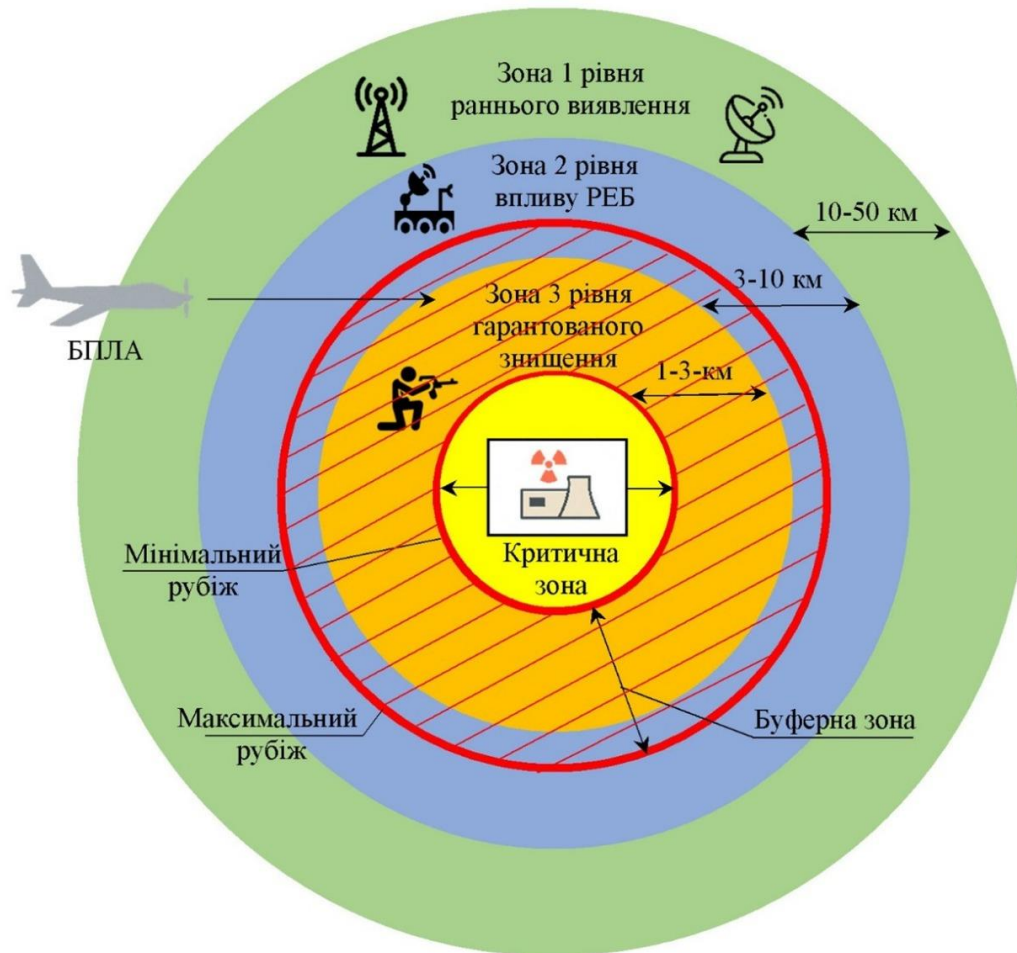


Рисунок 2 – Графічна схема організаційної структури системи протидії безпілотним літальним апаратам
(Джерело розроблено авторами)

З метою прогнозування імовірності протидії БПЛА силами та засобами військової частини Національної гвардії України у зазначених зонах розроблено комплексну модель протидії БПЛА силами та засобами військової частини з охорони важливого державного об'єкта (ядерної установки) (рис. 3).

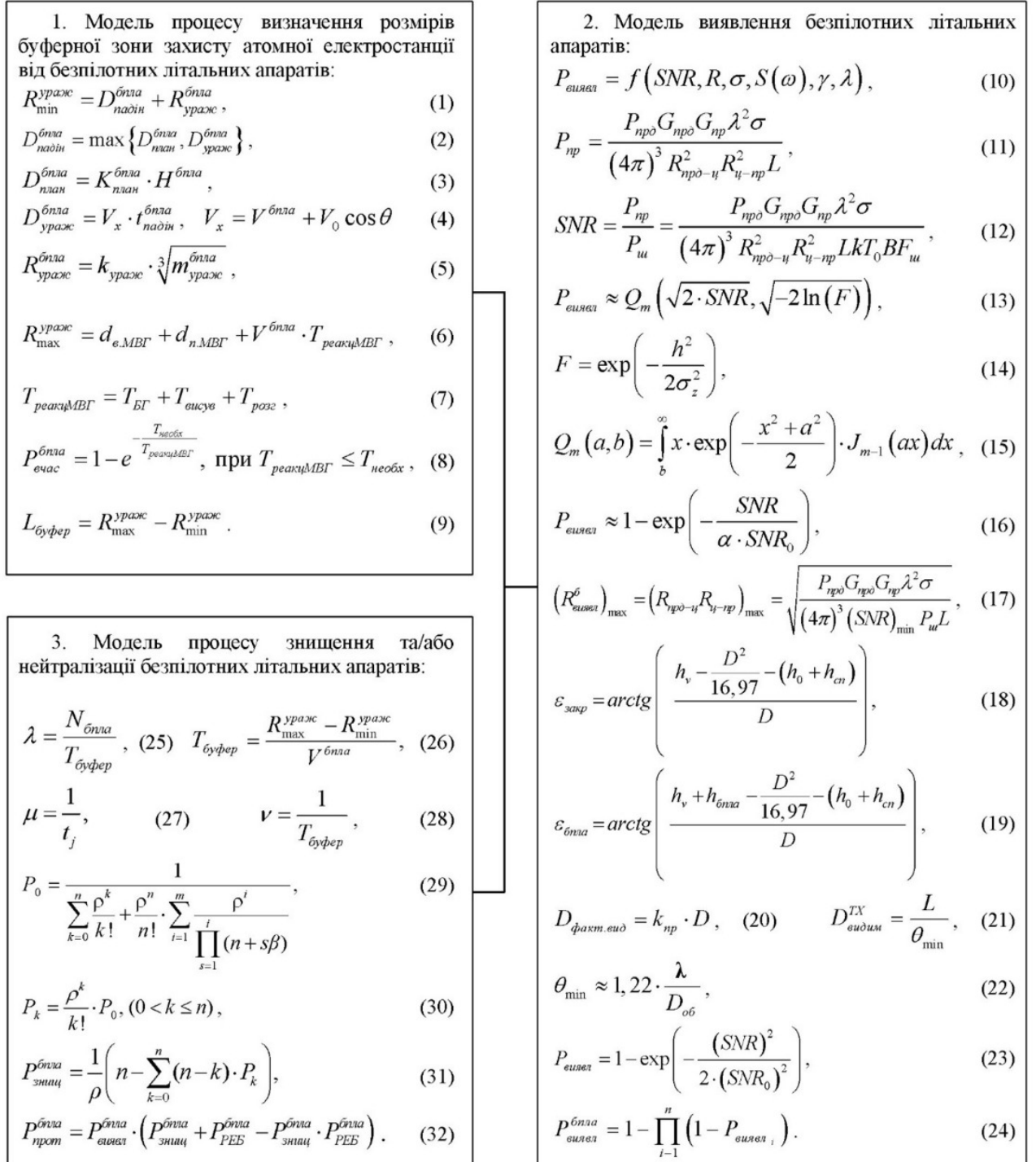


Рисунок 3 – Структурна схема комплексної моделі протидії безпілотним літальним апаратам силами та засобами військової частини охорони важливого державного об'єкта (ядерної установки) (Джерело розроблено авторами)

У межах цієї системи протидії БПЛА одним із запропонованих елементів є буферна зона (див. рис. 2). Вона охоплює простір між максимальним та мінімальним рубежами реагування й визначає область, у межах якої мають бути забезпечені виявлення, класифікація та знешкодження БПЛА до його входження у критичну зону об'єкта. Буферна зона інтегрує засоби першого і другого рівнів системи (виявлення і РЕБ) та створює умови для ефективного застосування мобільних вогневих груп у межах обмеженого часу на реагування.

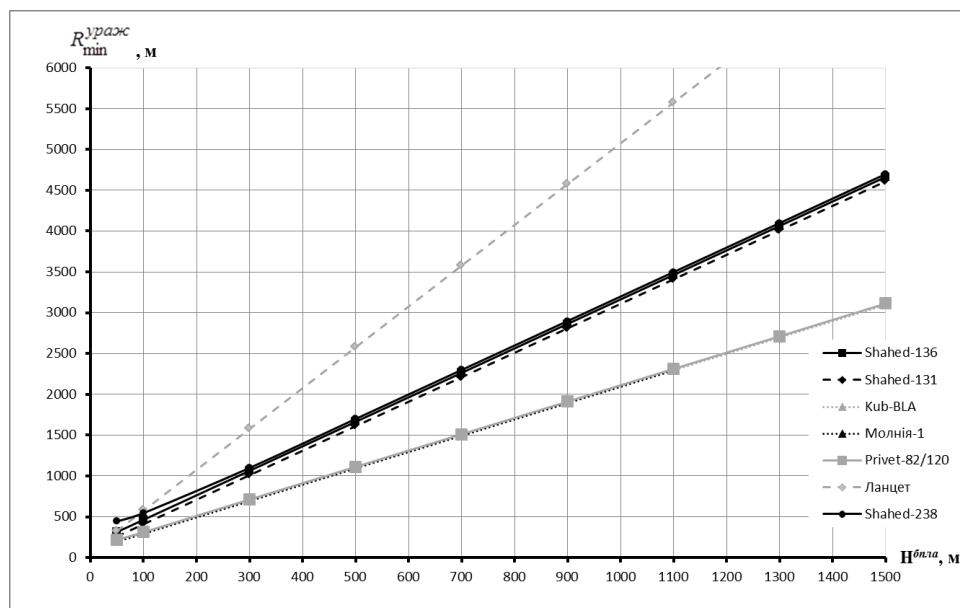
Параметри буферної зони визначаються за допомогою аналітичних виразів (1) – (9) блоку 1 (див. рис. 3). Зокрема, мінімальний рубіж $R_{\min}^{\text{ураж}}$ визначається як сума дальності падіння БПЛА $D_{\text{падін}}^{\text{бпла}}$ після впливу вражаючих чинників та максимального радіуса ураження бойовою частиною $R_{\text{ураж}}^{\text{бпла}}$ після падіння БПЛА [вираз (1)]. Дальність падіння $D_{\text{падін}}^{\text{бпла}}$ обчислюється за виразом (2) та розглядається для двох випадків:

1) втрата керованості після дії РЕБ, який залежить від коефіцієнта аеродинамічної якості БПЛА $K_{\text{план}}^{\text{бпла}}$ та висоти втрати керованості $H^{\text{бпла}}$ [вираз (3)] [10];

2) ураження БПЛА вогневыми засобами, яке залежить від швидкості БПЛА $V^{\text{бпла}}$, початкової швидкості уламків V_0 , висоти польоту, кутів вильоту уламків θ , аеродинамічного опору, форми та маси осколків [вираз (4)] [11, 12].

Радіус ураження бойовою частиною БПЛА $R_{\text{ураж}}^{\text{бпла}}$ після падіння, який залежить від маси вибухової речовини $m_{\text{ураж}}^{\text{бпла}}$ та емпіричного коефіцієнта $k_{\text{ураж}}$, визначаємо за емпіричною формулою (5) [13].

У програмному середовищі Excel отримано залежності значення мінімального рубежу $R_{\min}^{\text{ураж}}$ від різних тактико-технічних характеристик (ТТХ) БПЛА (висота, швидкість, маса бойової частини тощо). Наприклад, на рисунку 4 наведено залежності $R_{\min}^{\text{ураж}}$ від висоти польоту для різних БПЛА.



Рисунки 4 – Залежність дальності мінімального рубежу від висоти польоту для різних безпілотних літальних апаратів
(Джерело розроблено авторами)

Максимальний рубіж буферної зони $R_{\max}^{\text{ураж}}$ (рис. 5) визначається за виразом (6). Його величина залежить від дальності ураження наявними засобами вогневого ураження МВГ $d_{\text{п.МВГ}}$, просторового розміщення вогневих позицій $d_{\text{в.МВГ}}$, швидкості руху повітряної цілі $V^{\text{бпла}}$ та часу реакції МВГ $T_{\text{реакц.МВГ}}$.

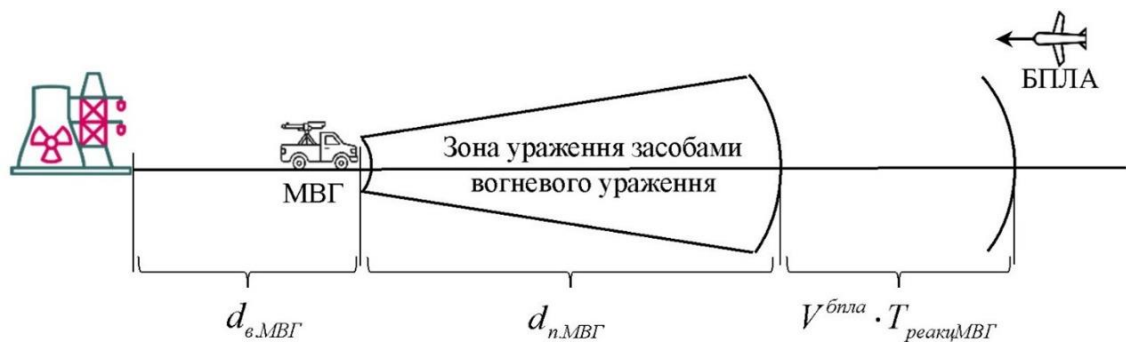


Рисунок 5 – Схема визначення максимального рубежу ($R_{\max}^{\text{ураж}}$) буферної зони захисту АЕС

Час реакції МВГ $T_{\text{реакцМВГ}}$ [вираз (7)] це сумарний час бойової готовності $T_{\text{БГ}}$, висування на вогневу позицію $T_{\text{висув}}$ підготовки до стрільби $T_{\text{розг}}$. У цьому випадку ймовірність успішної підготовки МВГ $P_{\text{вчас}}^{\text{бпла}}$ до ураження цілі після її виявлення [вираз (8)] залежатиме від часу підльоту БПЛА $T_{\text{необх}}$ до максимального рубежу $R_{\max}^{\text{ураж}}$ та часу реакції МВГ $T_{\text{реакцМВГ}}$.

Визначення меж буферної зони захисту створює основу для просторового планування дій сил підрозділу ППО військової частини з охорони АЕС щодо захисту від БПЛА. Проте ефективне реагування можливе лише за умови завчасного виявлення повітряних загроз ще до входження БПЛА у цю зону. Одним із перспективних напрямів є застосування мобільних бістатичних радіолокаційних систем (БРЛС) для виявлення цілей (рис. 6), які використовують сигнали зовнішнього підсвічування (FM, DVB-T, GSM тощо) [14, 15].

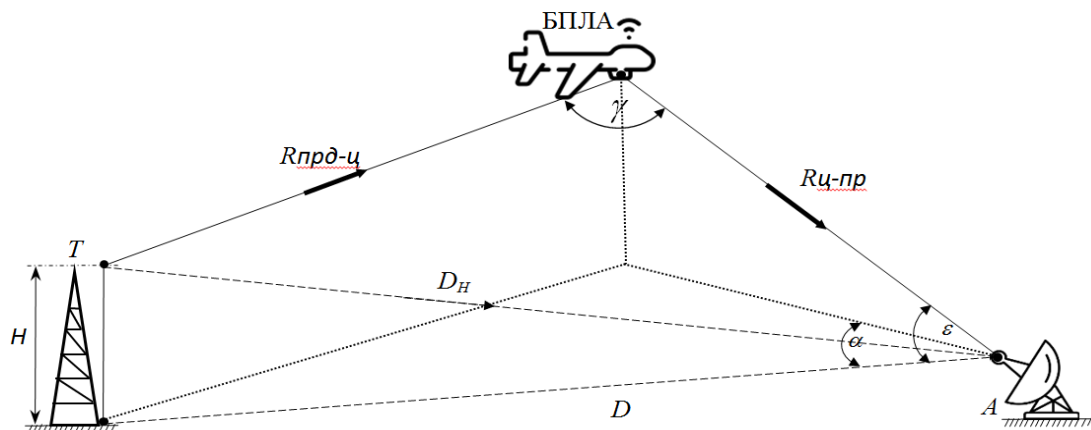


Рисунок 6 – Геометрія бістатичної радіолокації безпілотних літальних апаратів:

A – приймальна антена; T – передавальна антена; $R_{\text{ц-пр}}$ – відстань від БПЛА до приймальної антени; $R_{\text{прд-ц}}$ – відстань від передавальної антени до БПЛА; D – відстань від приймальної антени до передавальної антени (база); D_H – дальність прямої видимості; α – азимут БПЛА, відрхований від бази; ϵ – кут місця БПЛА, відрхований від горизонту; γ – бістатичний кут

Основні переваги цього підходу – прихованість роботи, низька вартість, використання вже наявних джерел випромінювання, можливість створення зони дії необхідної конфігурації, а також можливість оперативного розгортання у польових умовах. Саме ці чинники обумовлюють доцільність застосування БРЛС для виявлення БПЛА під час захисту об'єктів критичної інфраструктури, зокрема АЕС. Крім того, під час розгортання позиції виявлення так, щоб ціль знаходилася між передавачем та приймачем (тобто $\gamma \approx 180^\circ$), можна очікувати поліпшення ймовірності виявлення унаслідок підвищеної бістатичної ефектної поверхні розсіювання (ЕПР), особливо у разі використання коротших хвиль (вищих частот) [16].

Імовірність виявлення $P_{\text{виявл}}$ [вираз (10)] залежить від роздільної здатності, енергетичних характеристик джерела підсвічування ($P_{\text{прд}}, G_{\text{прд}}, \lambda$), геометрії розміщення системи (R, γ), швидкості цілі $V^{\text{бпла}}$, її ЕПР σ , завад, спектральних характеристик сигналу $S(\omega)$ та часу перебування об'єкта в зоні виявлення.

Математичні вирази (11) – (17) блоку 2 (див. рис. 3) дають змогу оцінити потужність прийнятого сигналу $P_{\text{пр}}$ відношення сигнал/шум SNR , імовірність виявлення $P_{\text{виявл}}$ та максимальну дальність дії системи $(R_{\text{виявл}}^{\text{б}})_{\text{мах}}$ залежно від характеристик передавача, приймача, типу сигналу та параметрів цілі [17–20]. Для підвищення оперативності ухвалення рішень у моделі також передбачено використання експоненціальної апроксимації імовірності виявлення [вираз (16)], що спрощує розрахунки в режимі реального часу. Виявлення цілі в бістатичному каналі дає можливість сформувати сектор імовірного наближення БПЛА і надалі уточнити розрахунок мінімального рубежу та зону видимості для позицій МВГ.

Місця розміщення МВГ мають виноситися за межі АЕС на відстань, не меншу за мінімальний рубіж. Зі збільшенням цієї відстані зростає імовірність збереження об'єкта, але і потреба в більших ресурсах. За обмежених ресурсів виникає задача розміщення МВГ якнайближче до периметра з урахуванням наявних засобів [21]. У зв'язку з цим для раціонального розміщення МВГ необхідно розрахувати зони прямої видимості з урахуванням ТТХ оптичних, оптико-електронних і візуальних засобів, рельєфу та погодних умов. Визначення зони прямої видимості від точки розташування МВГ здійснюється графоаналітичним методом за допомогою геоінформаційних систем (наприклад, програмний комплекс «Кропива», інформаційно-комунікаційна система «ДЕЛЬТА» та ін.). Під час розв'язання цієї задачі [вирази (18), (19)] за допомогою кутів закриття ($\varepsilon_{\text{закр}}$) і візування БПЛА ($\varepsilon_{\text{бпла}}$) визначається максимальна дальність виявлення БПЛА особовим складом МВГ [22].

Погодні умови враховуються коефіцієнтом прозорості атмосфери $k_{\text{пр}}$ [22], що коригує фактичну дальність видимості $D_{\text{факт.вид}}$ [вираз (20)]. Дальність виявлення $D_{\text{видим}}^{\text{TX}}$ коригується за технічними характеристиками оптико-електронних засобів (мінімальна кутова здатність θ_{min} , діаметр об'єктива $D_{\text{об}}$) та залежить від розміру БПЛА L [вирази (21), (22)]. Позиції МВГ визначаються за критерієм $D_{\text{факт.вид}} \leq D_{\text{видим}}^{\text{TX}}$, який гарантує імовірність виявлення БПЛА оптико-електронними засобами з урахуванням нелінійної статистики шумів і порогового співвідношення сигнал/шум SNR_0 , необхідним для досягнення $P_{\text{виявл}} = 0,5$, а також перекриття кожної точки простору по заданому рубежу хоча б однієї МВГ.

Загальна ймовірність виявлення БПЛА $P_{\text{виявл}}^{\text{бпла}}$ у разі використання кількох незалежних засобів (бістатичне, оптико-електронне, візуальне) розраховується за формулою (24).

У блоці 3 розглянуто процес знищення та/або нейтралізації БПЛА силами і засобами військової частини з охорони АЕС. Застосування засобів вогневого ураження (ППО, стрілецька зброя тощо) здійснюється переважно в межах заздалегідь визначеної зони гарантованого знищення або частково в буферній зоні. Оскільки засоби вогневого ураження МВГ обмежені у кількості, а надходження БПЛА – випадкове, модель описується системою масового обслуговування (типу М/М/п/т з виходом із черги) з пуассонівським входним потоком (М) з інтенсивністю λ , яка визначається за виразом (25), експоненційним часом обслуговування (М) [вираз (26)], n каналами та обмеженою чергою розміром t , що описує кількість БПЛА, які можуть одночасно перебувати в зоні ураження.

Процес знищення одного БПЛА має експоненціальний розподіл з інтенсивністю μ , що визначається виразом (27). Протилежний процес пропуску цілі, тобто БПЛА здійснює атаку або стає недоступним для знищення, відбувається з інтенсивністю ν [вираз (28)].

Граф моделі обслуговування цілей зі станами S_j ($j=0, \dots, m$), де j – кількість цілей, що знаходиться у системі, наведено на рис. 7.

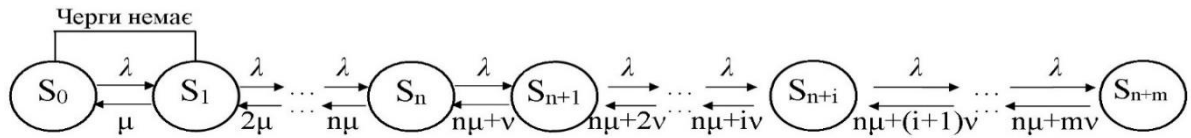


Рисунок 7 – Граф станів моделі обслуговування повітряних цілей

З метою визначення імовірностей станів моделі обслуговування використовуємо вирази (29), (30), де $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, $\beta = \frac{\nu}{\mu}$ – коефіцієнти завантаження каналів та залишення черги цілями відповідно. Імовірність

успішного знищення БПЛА $P_{знищ}^{бпла}$ вогневыми засобами МВГ обчислюється за виразом (31) [2].

У розробленій комплексній моделі протидії БПЛА закладено, що поряд із засобами вогневого ураження до складу системи захисту важливих державних об'єктів, зокрема АЕС, входять засоби радіоелектронної боротьби. Тоді загальну ймовірність нейтралізації БПЛА в системі захисту слід розглядати як комбінацію трьох імовірностей: загальної імовірності успішного виявлення БПЛА – $P_{виявл}^{бпла}$; середньої імовірності придушення бортових систем БПЛА засобами РЕБ – $P_{РЕБ}^{бпла}$; імовірності успішного знищення БПЛА вогневыми засобами МВГ – $P_{знищ}^{бпла}$.

Оскільки застосування як РЕБ, так і вогневого ураження можливе лише після виявлення цілі, підсумкова ймовірність успішної протидії БПЛА $P_{прот}^{бпла}$ силами та засобами військової частини, що здійснює оборону ядерної установки, розраховується за виразом (32).

Висновки

У статті розроблено комплексну модель протидії безпілотним літальним апаратам силами військової частини Національної гвардії України під час здійснення оборони ядерної установки, яка дає можливість: визначити межі буферної зони залежно від характеристик повітряних цілей; оптимізувати розміщення мобільних вогневих груп; оцінити, чи достатньо засобів МВГ для протидії очікуваному потоку безпілотних літальних апаратів; визначити критичну кількість БПЛА, за якої система перевантажується (висока інтенсивність виходу з черги); адекватно моделювати процес бойового застосування засобів вогневого ураження мобільних вогневих груп у буферній зоні АЕС, урахувавши ймовірнісну природу надходження цілей, обмеження вогневих можливостей, а також критичний часовий інтервал, упродовж якого можливе ефективне знешкодження цілей.

На відміну від наявних моделей [2, 4, 6], розроблена комплексна модель урахує застосування мобільних вогневих груп з визначенням їхнього місця розташування, використовуючи підхід перекриття зон видимості із застосуванням ГІС та системи завчасного виявлення з використанням мобільних бістатичних радіолокаційних засобів.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення методу оцінювання можливостей військових частин Національної гвардії України з оборони ядерних установок з урахуванням розробленої комплексної моделі протидії безпілотним літальним апаратам.

Перелік джерел посилання

1. Командування Повітряних Сил Збройних Сил України. Офіційна публічна сторінка. URL: <https://surl.li/vwtihd> (дата звернення: 30.06.2025).
2. Сукоцько С. М., Городнов В. П., Малюга В. Г., Головань О. М. Модель протидії безпілотним літальним апаратам силами та засобами військових частин з охорони атомних електростанцій. *Чесць і закон*. 2019. № 1 (68). С. 12–22.
3. Сукоцько С. М., Городнов В. П., Купрієнко Д. А. Комплексна модель оцінювання можливостей військової частини Національної гвардії України з охорони ядерної установки. *Чесць і закон*. 2019. № 2 (69). С. 20–32.

4. Чернега В. М., Гудима О. П., Плахотний В. М. Плахотна М. М. Математична модель комплексної протидії безпілотним літальним апаратам. *Повітряна міць України*. 2024. № 2 (7). С. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-43-49>.
5. Шевчук В. В., Кривошеєв В. В., Швець М. М. Вимоги до системи боротьби з безпілотними літальними апаратами. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. № 2 (47). С. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-133-138>.
6. Шовкошитний І. І. Математична модель оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами на основі ймовірнісного підходу. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. № 1 (49). С. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-35-44>.
7. Завацький О. В., Талкін Ю. В., Мельниченко А. В. Активні способи боротьби із безпілотними літальними апаратами у сучасних умовах ведення бойових дій. *Military Scientific Journal*. 2024. № 4. С. 149–159. DOI: <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.4.17>.
8. Волотівський П. Б., Гончаров О. В., Давиденко В. М., Мамонова Н. Л. Способи та засоби протидії БПЛА, їх переваги та недоліки. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. Київ : ДНДІА, 2024. Вип. 20 (27). С. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.54858/dndia.2024-20-7>.*
9. Бабич А. П., Єрмоєнко О. О. Архітектура системи протиповітряної оборони військ і об'єктів на полі бою в контексті протидії ударним безпілотним літальним апаратам. *Випробування та сертифікація*. 2024. Вип. 2 (4). С. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.09>.
10. Лемко О. Л., Гребенніков С. О. Особливості розрахунку аеродинамічних та льотно-технічних характеристик безпілотного літального апарату модульної конструкції. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машинобудування*. 2015. № 2 (75). С. 53–61.
11. Anderson J. D. Fundamentals of Aerodynamics. 6th ed. New York : McGraw-Hill, 2016. 1152 p.
12. Mueller T. J., DeLaurier J. D. Aerodynamics of Small Vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 35. P. 89–111. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161102>.
13. Explosion Physics / Ф. А. Баум та ін. ; за ред. Л. П. Орленко. Пекін : Science Press, 2011. 768 с.
14. Волков П. Ю., Горєлишев С. А., Олещенко О. А. Особливості побудови бістатичної радіолокаційної системи прихованого спостереження за зоною охорони важливих державних об'єктів. *Честь і закон*. 2021. № 3 (78). С. 52–63.
15. Comparison of the parameters of signals with external illumination for supervision of the area for the protection of important state objects / S. Horielyshev et al. *EUREKA : Physics and Engineering*, 2021. № 1 (32). P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001607>.
16. Горєлишев С. А., Волков П. Ю., Олещенко О. А. Характеристики радіолокаційного розсіювання особи-порушника у системі прихованого радіолокаційного спостереження. *Честь і закон*. 2021. № 4 (79). С. 20–32. DOI: <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2021/4/79/251495>.
17. Skolnik M. I. Radar Handbook. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 2001. 1328 p.
18. Willis N. J. Bistatic Radar. 2nd ed. Raleigh, NC : SciTech Publishing, 2005. 329 p.
19. Mahafza B. R. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 3rd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2013. 772 p.
20. Cherniakov M. Bistatic Radar: Principles and Practice. Chichester : John Wiley & Sons, 2007. 404 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470035085>.
21. Оцінювання ефективності захисту стратегічно важливих об'єктів від безпілотних літальних апаратів силами протиповітряної оборони / Ю. Бабій та ін. *Military Science*. 2024. № 2 (2). С. 116–130. DOI: <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.2.10>.
22. Онопрієнко О., Споришев К., Сінкевич С. Геоінформаційна модель ізоляційно-обмежувальних заходів (оточення) району затоплення силами Національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Військові та технічні науки*. Хмельницький : НА ДПСУ, 2022. № 4 (89). С. 203–225. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v89i4.1281>.

Стаття надійшла до редакції 07.07.2025 р.

O. Rosliakov, S. Horielyshev

**COMPREHENSIVE MODEL OF COUNTERACTION AGAINST UNMANNED AIRCRAFT
BY FORCES AND MEANS MILITARY UNIT ON THE PROTECTION OF AN IMPORTANT
GOVERNMENT FACILITY (NUCLEAR INSTALLATION)**

This article proposes a comprehensive three-layer model for countering unmanned aerial vehicles by a military unit of the National Guard of Ukraine during the defense of a nuclear facility. The model encompasses the stages of detection, electronic warfare, and fire engagement. The core element of the model is a buffer zone, defined as the area between the maximum and minimum response boundaries, within which unmanned aerial vehicles must be detected, classified, and neutralized before entering the critical zone of the protected facility.

The paper presents a mathematical framework for determining the parameters of the buffer zone, taking into account unmanned aerial vehicle characteristics such as altitude, speed, and warhead type, as well as the capabilities of available countermeasures. In particular, the model accounts for inertial gliding of drones after being hit, fragmentation dispersion, and the damage radius of the warhead.

Special attention is given to the integration of mobile bistatic radar detection systems that utilize external illumination sources (FM radio, DVB-T television, GSM signals and provide early target acquisition. Deploying the detection position so that the target is located between the transmitter and receiver (i.e., bistatic angle $\gamma \approx 180^\circ$) enhances the probability of detection due to increased bistatic radar cross-section, especially when using shorter wavelengths (higher frequencies). A spatial visibility zone analysis methodology is also proposed using GIS tools to optimize the placement of mobile fire groups.

A stochastic M/M/n/m queueing model with customer loss is proposed to account for the randomness of unmanned aerial vehicle incursions, limited air defense resources, and strict time constraints for neutralization. This model enables estimation of unmanned aerial vehicle breakthrough probability under mass attack scenarios. The overall probability of successful counteraction is defined as a combination of the probabilities of detection, electronic warfare disruption, and physical destruction, where electronic warfare contributes to reducing the breakthrough probability before the unmanned aerial vehicle enters the buffer zone.

The developed integrated model for unmanned aerial vehicle counteraction enables assessment of the protective system's effectiveness, identification of the critical number of incoming targets that would overload the system, and optimization of National Guard of Ukraine resource allocation during the defense of nuclear facilities.

Keywords: *Unmanned Aerial Vehicles, Nuclear Facility, Buffer Zone, Bistatic Radar, Mobile Fire Groups.*

Росляков Олексій Васильович – ад'юнкт, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0001-9211-562X>

Горелишев Станіслав Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>