

5. Baranowski L., Gadomski B., Majewski P. and Szymonik J. Explicit “ballistic M-model”: a refinement of the implicit “modified point mass trajectory model”. Bulletin of the Polish Academy of sciences technical sciences. 2016. Vol. 64, No. 1, pp. 81-89. DOI: 10.1515/bpasts-2016-0010.

6. Kincaid D. Numerical analysis. Brooks : Cole Publishing Company. 1991. 690 p.

7. Bradley J.W. An alternative form of the modified point-mass equation of motion. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, Report № BRL-MR-3875, 1990.

References

1. McCoy R. L. Modern Exterior Ballistics. Atglen, PA. : Schiffer Military History, 2012. 328 p.

2. Dmitriyevskiy A. A. and Lisenko L. N. (2005). “Vneshnyaya ballistika” [External ballistics]: Moskva : Mashinostroyeniye, 607 p. [in Russian].

3. STANAG 4355 (Edition 3), The modified point mass and five degrees of freedom trajectory models: NSAI0454(2009)-JAIS/4355, dated 17 April 2009. 95 p. (NATO Standardization Agency).

4. Carlucci D. E., Jacobson S. S. Ballistics, theory and design of guns and ammunition : book. London, New York : Taylor & Francis Group, 2007. 514 p.

5. Baranowski L., Gadomski B., Majewski P. and Szymonik J. Explicit “ballistic M-model”: a refinement of the implicit “modified point mass trajectory model”. Bulletin of the Polish Academy of sciences technical sciences. 2016. Vol. 64, No. 1, pp. 81-89. DOI: 10.1515/bpasts-2016-0010.

6. Kincaid D. Numerical analysis. Brooks : Cole Publishing Company. 1991. 690 p.

7. Bradley J.W. An alternative form of the modified point-mass equation of motion. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, Report № BRL-MR-3875, 1990.

EXPLICIT FORM OF THE MODIFIED MODEL OF THE MATERIAL POINT IN THE SPHERICAL COORDINATE SYSTEM

R. Bubenshchykov

Projectile movement can be described by one of three mathematical models, which differ from each other in the main level of complexity and, accordingly, the level of adequacy to the real process of projectile movement in the air. Differential equations are the basis of mathematical models that characterize the spatial movement of a projectile. A modified model of a material point is presented, as a mathematical model of the flight of a projectile moving in the air; as components of the main vector of the acting forces, the components of the full aerodynamic force are taken into account - the force of frontal resistance and the lifting force, the Magnus force. The differential equations of the modified material point model additionally take into account the rotational motion of the projectile around its axis of symmetry, as well as nutational oscillations of the projectile. It is shown that the practical application of the modified material point model is limited by the presence of an implicit ordinary differential equation. Thus, the total yaw angle, in the modified material point model, depends on the acceleration of the projectile flight, which leads to a differential equation determined by an implicit function. An implicit differential equation defines the derivative as an implicit function, that is, the equation is unsolved with respect to the derivative. This makes the modified material point model difficult to solve. The article describes the procedures for transforming the system of differential equations of the modified material point model into an explicit form, which allows them to be solved on the basis of standard numerical methods. A closed system of differential equations based on the trajectory parameters of the projectile flight is obtained, which is presented in spherical coordinate systems, as well as a system of algebraic equations for projectile nutation angles.

Keywords: mathematical model, modified model, nutation angle, aerodynamic forces (moments), projectile, differential equations, spherical coordinates, implicit function

УДК 621.39

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.10-26>

Б.Ю. Волочій^{1,2}, В.А. Онищенко¹, Л.Д. Озірковський^{1,2}, В.В. Хахула¹

¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

²Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

Article history: Received 18 September 2023; Revised 19 September 2023; Accepted 30 September 2023

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розглядаються варіанти формування радіоелектронних комплексів виявлення БпЛА з використанням в їх складі радіолокаційної, оптико-електронної, тепловізійної та акустичної систем із заданими значеннями показників ефективності при автономному їх застосуванні. Показані результати порівняння ефективності

восьми варіантів формування радіоелектронних комплексів для виявлення БпЛА типу «Ланцет», «Shahed-136» та «Куб». В цих варіантах розглянуто два радіоелектронних комплекси, в яких передбачено поєднання 3 систем і 6 радіоелектронних комплексів, в яких передбачено поєднання двох систем. Для оцінювання ефективності радіоелектронного комплексу виявлення безпілотних літальних апаратів одного типу використано показник «ймовірність виявлення БпЛА». Для визначення показника ефективності запропонована дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу в складі радіолокаційної, оптико-електронної або тепловізійної та акустичної систем із заданим алгоритмом його функціонування. Показано розроблення ймовірнісного графа станів і переходів, на основі якого сформована стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БпЛА у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена. Для оцінювання підвищення ефективності створюваних радіоелектронних комплексів виявлення БпЛА використано відношення значень ймовірності невиявлення БпЛА одною системою при автономному її застосуванні і ймовірності невиявлення БпЛА створеним радіоелектронним комплексом.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс, безпілотні літальні апарати, виявлення повітряних цілей, радіоелектронний комплекс виявлення БпЛА, експлуатаційна поведінка комплексу, дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної поведінки.

Постановка проблеми

З початку агресії російської федерації проти України для ураження особового складу, озброєння та військової техніки біля лінії розмежування, противник застосовує безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) з ударними безпілотними літальними апаратами (БпЛА) типу «баражуючий боєприпас» «Ланцет-1» і «Ланцет-3» (з перехресними крилами) та «Куб-БЛА» (літальний апарат типу «крило»), а з осені 2022 року – іранські БпЛА типу дрон-камікадзе «Shahed-136» [1, 2].

Основні характеристики БпЛА «Куб-БЛА», «Ланцет-1 (3)» та «Shahed-136» надаються в роботі [1].

Створення БпАК «Куб-БЛА» та «Ланцет-1 (3)» здійснюється одним розробником, тому їх елементна база та технічні рішення є аналогічними. Безпілотні літальні апарати «Куб-БЛА» і «Ланцет-1 (3)» застосовуються на малих висотах, мають малі розміри і відповідно низьку помітність для більшості технічних засобів спостереження. Це значно ускладнює вирішення завдання щодо їх завчасного виявлення та протидії їх застосуванню. Безпілотний літальний апарат «Shahed-136» має форму типу «крило» і суттєво перевищує масогабаритні характеристики БпЛА «Куб-БЛА», «Ланцет-1 (3)». Тому його сигнатури полегшують його виявлення.

Оскільки ударний БпАК складається, як правило, із БпЛА типу «баражуючий боєприпас» та пункту дистанційного пілотування (ПДП), він може виявлятися за сигнатурами від обох складових. Демаскуючими ознаками, що виділяють БпЛА в навколишньому середовищі, роблячи помітним для систем спостереження, можуть бути використані такі фізичні явища, як: відбиття радіохвиль від поверхні БпЛА; електромагнітне випромінювання радіоелектронних систем (РЕС), що є на борту БпЛА та ПДП; відбиття від поверхні БпЛА електромагнітних хвиль у видимій

ділянці спектра; випромінювання БпЛА в інфрачервоній ділянці електромагнітного спектра; акустичне випромінювання двигунів та повітряних гвинтів БпЛА [3].

Складність виявлення БпЛА «Куб-БЛА» і «Ланцет-1 (3)» зумовлена тим, що вони мають сигнатури незначної величини через те, що їх корпуси виготовляються із композитних матеріалів і пластику зі спеціальним забарвленням та з особливою комбінацією шарів, оснащені невеликими електричними двигунами, які мало випромінюють тепла і працюють майже безшумно.

Тому для виявлення БпЛА типу «баражуючий боєприпас» різними системами спостереження, які можуть забезпечити максимальні дальності і відповідно ефективне застосування засобів протидії, застосовуються радіоелектронні комплекси (РЕК) з різним складом [4]. В склад РЕК включають акустичні, інфрачервоні, оптико-електронні, радіолокаційні системи, системи радіолокаційної розвідки та інші. Варіанти поєднання систем в РЕК можуть бути різні, оскільки вони мають різне функціональне призначення та діють для виявлення певних ознак повітряних цілей [5].

Слід відзначити, що РЕК виявлення БпЛА з однаковими варіантами поєднання систем можуть мати різні алгоритми функціонування. Однакові за своїм складом РЕК при розгортанні в однакових за площею районах будуть мати різні умови функціонування через відмінності об'єктів, які вони прикривають, особливості місцевості або погодні умови.

Ефективність застосування противником БпЛА буде завжди різнитися через умови, що склалися в районах розгортання РЕК. В кожному окремому випадку умови можуть сприяти радіоелектронному комплексу виконувати бойове завдання або навпаки ускладнювати його виконання.

Аналіз засобів виявлення БпАК (БпЛА і ПДП) [6] свідчить, що найбільшого розповсюдження набули РЕК,

які поєднують у своєму складі: систему радіоелектронної розвідки (РЕР), радіолокаційну систему (РЛС), оптико-електронну систему (ОЕС), акустичну систему (АС) та інформаційно-керуючу систему (ІКС). Системи РЕК з певною ймовірністю можуть виявити роботу складових БпАК (ПДП та БпЛА), відстежити траєкторію руху БпЛА під час його перебування в контрольованій зоні та надати цілевказівку на засіб ураження.

Важливим чинником актуальності розроблення стохастичної моделі і відповідної методики є можливість за її допомогою визначати системи з числа існуючих, які доцільно включати в склад РЕК і відповідно зменшити кількість натурних випробувань. Ця ж обставина є важливою і при закупівлі систем (складових) для РЕК за кордоном.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

1. Публікації про удосконалення способів виявлення БпЛА подані для радіолокаційних систем, оптико-електронних, тепловізійних систем та акустичних систем.

Удосконалення радіолокаційних систем розглядається в публікаціях [6, 7, 8].

Автори статті [6] відзначають, що основною проблемою при радіолокаційному виявленні оперативно-тактичних та тактичних БпЛА є їх мала радіолокаційна помітність. Тому для виявлення таких літальних апаратів необхідні радіолокаційні засоби з високим енергетичним потенціалом. Такий енергетичний потенціал РЛС мають. Тому застосування таких РЛС для виявлення БпЛА на дальностях прямої видимості 10 – 20 км є доцільним. Однак треба прийняти до уваги, що РЛС не забезпечує ідентифікацію типу БпЛА і відповідно розпізнавання «свій-чужий». А також не забезпечує скритність своєї роботи.

В статті [7] автори вказують на те, що в даний час існує велика кількість публікацій, в яких розглянуто методи та системи, реалізовані на різних фізичних принципах, призначених для виявлення і розпізнавання БпЛА за наявності завад. Тому актуальним є завдання аналізу, узагальнення та систематизації наявних у публікаціях даних про методи виявлення і розпізнавання сигналів з використанням РЛС, ОЕС, ТВС, АС. Автори розглядають канали приймання, методи оброблення отриманих інформаційних сигналів та їх подальший інтелектуальний аналіз. Показано, що відомі методи енергетичного виявлення сигналів БпЛА є недостатньо ефективними, оскільки операція виконується, як правило, в присутності завад, які мають певну структурну схожість із сигналом від БпЛА. Основна увага приділяється методам інтерпретації отриманих даних з використанням навчених нейронних мереж.

В публікації [8] надані рекомендації, на що треба звертати увагу при оцінюванні якості РЛС для виявлення БпЛА та системи аналізу сигналів від БпЛА.

Удосконалення оптико-електронних та тепловізійних систем розглядається в публікаціях [7, 9, 10].

В статті [9] автори звернули увагу на доцільність розроблення алгоритмів супроводу малогабаритних БпЛА за даними відеоспостереження. Запропоновано кореляційний алгоритм калманівського типу для супроводу малогабаритного БпЛА за наявності просторово некорельованих завад, які найчастіше зустрічаються на практиці. Проведено аналіз точності позиціонування з використанням кореляційного алгоритму супроводу БпЛА на основі фільтра Калмана, який виконано шляхом статистичного моделювання в середовищі програмування Matlab.

Автор статті [10] стверджує, що розроблення систем виявлення та ідентифікації БпЛА на основі аналізу його оптичного та теплового полів залишається актуальною. Проведено огляд існуючих оптико-електронних та тепловізійних систем такого типу.

Удосконалення акустичних систем виявлення БпЛА розглядається в публікаціях [7, 11, 12, 13, 14].

Авторами статті [11] вдосконалено спосіб виявлення БпЛА за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. Показано, що акустичний сигнал, створюваний БпЛА, можна представити сумою гармонічних складових. Критерієм надійного виявлення БпЛА є знаходження у прийнятому акустичному сигналі як мінімум трьох характерних гармонік.

Автори статей [12, 13, 14] розглядають використання акустичної сигнатури для виявлення та ідентифікації БпЛА, які використовують для польоту низькі висоти.

2. Публікації з обґрунтуваннями доцільності (з рекомендаціями) поєднання різних типів систем виявлення БпЛА в один радіоелектронний комплекс [10, 15, 16, 17].

Автор статті [10] прийшов до висновку, що доцільним варіантом вирішення проблеми протидії БпЛА є розроблення багатофункціонального інтегрованого комплексу виявлення та ідентифікації БпЛА на основі поєднання радіолокаційного засобу виявлення малорухомих низьколітальних цілей (тобто з низькою доплерівською сигнатурою) та оптико-електронної системи. Запропоновано структуру багатофункціонального інтегрованого комплексу виявлення та ідентифікації БпЛА.

В статті [15] автори вказують, що низька ефективність використання РЛС і АС для виявлення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) пов'язана з їх низькою помітністю як в електромагнітному, так і в акустичному діапазонах довжин хвиль. Перспективним напрямком підвищення використання РЛС і АС є їх поєднання в одному комплексі. Оскільки сигнали як в акустичному, так і в радіолокаційному діапазонах модулюються частотою обертання ротора (колінвала) двигуна, то з'являється можливість сумісного оброблення цих сигналів. Метою досліджень є розроблення

методу виявлення БпЛА на основі аналізу їх сигнатур в акустичному та радіолокаційному діапазонах.

В статті [16] автори обґрунтовують доцільність введення тепловізійної системи в склад РЕК, в якому вже є ОЕС і АС. Показано результати дослідження залежності ефективності РЕК від відстані до цілі. Разом з цим автори статті відзначають, що поєднання трьох систем забезпечує (має) вищу надійність, ніж РЕК з двома системами. Для РЕК це означає зменшення кількості хибних повідомлень про виявлення і кількість невиявлених БпЛА.

Автори статті [17] пропонують алгоритм роботи РЕК, який має в своєму складі РЛС, АС і ОЕС.

3. Підходи до оцінювання ефективності систем виявлено в публікаціях [18, 19].

В статті [18] автори представляють методологію випробувань і оцінювання ефективності, призначену для створення засобів протидії БпЛА. Описаний підхід до випробувань визначає стратегії випробувань, показники ефективності, типи БпЛА, що випробовуються, ключові змінні і необхідний аналіз даних для точного кількісного визначення можливостей технологій протидії БпЛА. Проведені випробування, згідно з цим підходом, дозволяють визначити кількісні обмеження, сильні і слабкі сторони з точки зору виявлення, відстеження, класифікації і нейтралізації. Запропонована методологія випробувань і оцінювання ефективності технології протидії БпЛА доводить можливості кожної системи з виявлення, нейтралізації та відхилення хибних тривог до їхніх меж і розраховує корисні метрики, за допомогою яких можна порівнювати системи. Щоб проілюструвати простоту визначення ключових показників ефективності та методів тестування в статті представлено варіант технології протидії БпЛА, який був оцінений за допомогою запропонованої методології.

Автори статті [19] показують методику вирішення задач оцінювання показників ефективності виявлення тактичних БпЛА акустичними, оптико-електронними, тепловізійними та радіотехнічними активними і пасивними системами спостереження. Проаналізовано фактори, що впливають на ефективність виявлення. Ймовірність виявлення цілі в зоні дії кожної системи спостереження буде залежати від її здатності знаходити ціль у даних фізичних умовах контрольованої зони, особливостях польоту БпЛА через контрольовану зону та способу використання системи спостереження при виявленні цілі. Тоді в кожному конкретному випадку ймовірність виявлення цілі може бути правильно оцінена лише за відповідного врахування міри впливу кожного з цих факторів. Під ефективністю системи спостереження автори мають на увазі кількісно виражену успішність виявлення цілей. До кількісних показників ефективності систем спостереження автори відносять: дальність виявлення цілі R із заданими значеннями ймовірностей правильного

виявлення D та хибної тривоги F , розмірів площі огляду S . Авторами введено узагальнений показник ефективності E який «показує», що найбільш ефективною буде та система спостереження, яка при заданих значеннях ймовірностей правильного виявлення D та хибної тривоги F огляне найбільший об'єм простору V за мінімальний час.

Попри широке використання РЕК виявлення БпЛА з системами в різних конфігураціях [5] публікацій з розглядом стохастичних моделей їх експлуатаційної функційної поведінки для визначення показників ефективності не виявлено. Однак автори статті мають досвід розроблення дискретно-неперервних стохастичних моделей експлуатаційної функційної поведінки РЕК для інших призначень. Так застосування інформаційної технології стохастичного моделювання показано: в статті [20] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки прицільного РЕК в складі РЛС, ОЕС, лазерний віддалемір, тепловізійна система та ІКС; в статті [21] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК виявлення наземних об'єктів противника, які уражаються артилерійськими засобами; в статті [22] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки комплексу охоронної сигналізації, в якій враховано (представлено): всі варіанти фіксації рухомих об'єктів під час перетину двох контрольованих зон зі схемою розташування сейсмічних датчиків {3+3}, наявність двох схем прийняття рішення за мажоритарним принципом {2 із 3} для кожної контрольованої зони та наявність схеми визначення збігу повідомлень з контрольованих зон; в статті [23] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки, що призначена для розв'язання задач параметричного синтезу охоронної системи у складі комплексу охоронної сигналізації на сейсмічних датчиках та безпілотного авіаційного комплексу.

Формування мети статті

Метою статті є порівняльні дослідження варіантів поєднання в одному радіоелектронному комплексі виявлення безпілотних літальних апаратів радіолокаційної, оптико-електронної, тепловізійної і акустичної систем із застосуванням розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі його експлуатаційної функційної поведінки.

Виклад основного матеріалу

1. Вербальна модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення безпілотних літальних апаратів

Вербальна модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в складі системи радіоелектронної розвідки, РЛС, ОЕС, ТВС, АС, інформаційно-керуючої системи, сформована для описаного нижче варіанта алгоритму його функціонування.

1.1 Алгоритм функціонування радіоелектронного комплексу

Використаний варіант алгоритму функціонування радіоелектронного комплексу є таким.

Початок: на позицію виведено БпЛА разом з пультом дистанційного пілотування. Включено (перевіряється) радіозв'язок пульта дистанційного пілотування з БпЛА.

Крок 1: Система радіоелектронної розвідки (РЕР) виявляє появу (готовність до роботи) БпЛА і передає цілевказівку до інформаційно-керуючої системи (ІКС). Для програмної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК прийнята умова, що ймовірність виявлення системою РЕР готового до роботи БпЛА дорівнює 1.

Крок 2: Інформаційно-керуюча система дає команду радіолокаційній системі (РЛС) розпочати роботу. Для роботи РЛС інформаційно-керуюча система задає (визначає) тривалість, яка відповідає швидкості польоту БпЛА через дальню контрольовану зону місцевості.

Якщо РЛС виявляє БпЛА, то передає повідомлення до ІКС. Інформаційно-керуюча система в свою чергу передає повідомлення до засобу ураження, що для програмної стохастичної моделі означає – «завдання РЛС виконано». Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через дальню контрольовану зону так завершився, в програмній стохастичній моделі представлена показником ефективності РЛС «ймовірність виконання завдання з використанням РЛС».

Якщо заданий (визначений ІКС) час роботи РЛС вичерпано (закінчився), а БпЛА не виявлено, то перехід на *крок 3*. Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через дальню контрольовану зону так завершився, в програмній стохастичній моделі представлена показником ефективності РЛС «ймовірність невиконання завдання з використанням РЛС».

Крок 3: Інформаційно-керуюча система включає в роботу (залучає до роботи) оптико-електронну систему (ОЕС). Для роботи ОЕС інформаційно-керуюча система задає тривалість, яка відповідає тривалості польоту БпЛА через середню контрольовану зону місцевості. Швидкість БпЛА вже є відомою (визначена на *кроці 2*). Відповідно знаємо доцільну тривалість роботи ОЕС в середній контрольованій зоні.

Якщо ОЕС виявляє БпЛА, то передає повідомлення до ІКС. Інформаційно-керуюча система в свою чергу передає повідомлення до засобу ураження, що для програмної стохастичної моделі означає – «завдання ОЕС виконано». Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через середню контрольовану зону так завершився, в програмній стохастичній моделі представлена показником ефективності ОЕС «ймовірність виконання завдання з використанням ОЕС».

Якщо заданий час роботи ОЕС вичерпано (закінчився), а БпЛА не виявлено, то перехід на *крок 4*. Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через середню контрольовану зону так завершився, в програмній стохастичній моделі представлена

показником ефективності ОЕС «ймовірність не виконання завдання з використанням ОЕС».

Крок 4: Інформаційно-керуюча система включає в роботу (залучає до роботи) акустичну систему (АС). Для роботи АС інформаційно-керуюча система задає тривалість, яка відповідає тривалості польоту БпЛА в ближній контрольованій зоні (біля розміщення РЕК).

Якщо АС виявляє БпЛА, то передає повідомлення до ІКС. Інформаційно-керуюча система в свою чергу передає повідомлення до засобу ураження, що для програмної стохастичної моделі означає – «завдання АС виконано». Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через ближню контрольовану зону так завершився, в програмній стохастичній моделі представлена показником ефективності АС «ймовірність виконання завдання з використанням АС».

Якщо заданий час роботи АС вичерпано (закінчився), а БпЛА не виявлено, то робота РЕК закінчена. Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через ближню контрольовану зону так завершився, в програмній стохастичній моделі представлена показником «ймовірність не виконання завдання з використанням АС».

Позитивними сторонами такого алгоритму функціонування РЕК виявлення БпЛА є:

а) радіолокаційна система забезпечує виявлення БпЛА далеко від зони дії засобу ураження;

б) присутність РЛС в складі радіоелектронного комплексу з розглянутим алгоритмом функціонування забезпечує певний рівень скритності її роботи, так як її включення мають малу тривалість. Тривалість включень РЛС відповідає часу перетину БпЛА дальньої контрольованої зони.

1.2. Припущення та умови, які враховано в стохастичній моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу

1) Інформаційно-керуюча система всі функції виконує успішно з ймовірністю 1.

2) Ймовірність виявлення системою радіоелектронної розвідки БпЛА, що прямує до об'єкта критичної інфраструктури, дорівнює 1

3) В стохастичній моделі тривалості роботи РЛС з командою інформаційно-керуючої системи, тобто від початку (від розрахункового моменту появи БпЛА в дальній контрольованій зоні) до моменту його виявлення, представлені експоненційним законом розподілу. Такий закон розподілу для тривалостей роботи РЛС відповідає умові, що в більшості перельотів БпЛА через дальню контрольовану зону РЛС виявляє БпЛА на її початковій ділянці. І дуже рідко на її кінцевій ділянці.

4) В стохастичній моделі тривалості роботи ОЕС з командою інформаційно-керуючої системи, тобто від початку (від розрахункового моменту появи БпЛА в середній контрольованій зоні) до моменту виявлення БпЛА, також представлені експоненційним законом розподілу. В наступній версії стохастичної моделі треба прийняти до уваги, що при зменшенні відстані між

БпЛА і РЕК в середній контрольованій зоні умови виявлення БпЛА оптико-електронною системою покращуються. Тому для тривалостей роботи ОЕС в наступній версії стохастичної моделі слід використовувати закон розподілу Ерланга порядку вище 3 (це число треба уточнити в процесі дослідження).

5) В стохастичній моделі тривалості роботи АС з командою інформаційно-керуючої системи, тобто від початку (від розрахункового моменту появи БпЛА в ближній контрольованій зоні) до моменту виявлення БпЛА, також представлені експоненціальним законом розподілу. В наступній версії стохастичної моделі треба прийняти до уваги, що при зменшенні відстані між БпЛА і РЕК в ближній контрольованій зоні умови його виявлення акустичною системою покращуються. Тому для тривалостей роботи АС в наступній версії стохастичної моделі слід використовувати закон розподілу Ерланга порядку вище 10 (це число треба уточнити в процесі дослідження).

6) В стохастичній моделі вважається, що під час кожного прольоту БпЛА перетинає дальню, середню та ближню контрольовані зони саме в такій послідовності.

1.3. Визначення базових подій експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу для її стохастичної моделі

Всі події експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу, які враховано в її стохастичній моделі, представлено в таблиці 1. В якості базових подій для стохастичної моделі використовуємо події, що представляють закінчення процедур алгоритму функціонування РЕК [24, с. 65–71].

Таблиця 1

Події експлуатаційної функційної поведінки РЕК для її стохастичної моделі

Подія-початок	Подія-закінчення	Середнє значення тривалостей ...
Система РЕК виявила БпЛА і передала про це цільовказівку (ЦВ) в ІКС	Цільовказівка, передана системою РЕК, прийнята в ІКС – БПО	-----
За командою від ІКС розпочала роботу РЛС в дальній контрольованій зоні	РЛС виявила БпЛА або закінчився час роботи РЛС з виявлення БпЛА в дальній контрольованій зоні – БП1	$T_{РЛС} \rightarrow T_{RL}$
За командою від ІКС і ЦВ від РЕК, або від РЛС, розпочала роботу ОЕС	ОЕС виявила БпЛА або закінчився час роботи ОЕС з виявлення БпЛА в середній контрольованій зоні – БП2	$T_{ОЕС} \rightarrow T_{OE}$
За командою від ІКС і ЦВ від РЕК, або від РЛС, або від ОЕС, розпочала роботу АС	АС виявила БпЛА або закінчився час роботи АС з виявлення БпЛА в ближній контрольованій зоні – БП3	$T_{АС} \rightarrow T_A$

Згідно з таблицею 1 базовими подіями експлуатаційної функційної поведінки РЕК є:

БПО – для моделі приймаємо, що альтернатив немає. Тобто система радіоелектронної розвідки (РЕР) завжди виявляє БпЛА і дає повідомлення (цільовказівку) до інформаційно-керуючої системи (ІКС).

БП1 – завершення роботи РЛС, яке може бути успішним або неуспішним. Успішна робота РЛС означає, що на засіб ураження (ЗУ) передаються повідомлення про координати траєкторії руху цілі. Завдання, покладене на РЕК, виконано. Неуспішна робота РЛС означає, що в дальній контрольованій зоні БпЛА не виявлено. Причини невиявлення БпЛА: БпЛА має постановник завад, або особливості місцевості і БпЛА здійснює політ на малій висоті.

БП2 – завершення роботи ОЕС, яке може бути успішним або неуспішним. Успішна робота ОЕС означає, що на ЗУ передаються повідомлення про координати траєкторії руху цілі. Завдання, покладене на РЕК, виконано. Причини невиявлення БпЛА оптико-електронною системою: туман, снігопад, БпЛА не зайшов в середню контрольовану зону.

БП3 – завершення роботи АС, яке може бути успішним або неуспішним. Причини невиявлення БпЛА акустичною системою: БпЛА не зайшов в ближню контрольовану зону.

1.4. Вектор станів для представлення (розроблення) вербальної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу у вигляді ймовірнісного графа станів і переходів

Компонента вектора станів $V1$ – «показує» стан радіолокаційної системи. Значення компоненти: $V1 = 0$ – радіолокаційна система очікує команду від ІКС «розпочати роботу» і цільовказівку (ЦВ); $V1 = 1$ – радіолокаційна система з цільовказівки виявила БпЛА до закінчення встановленого інформаційно-керуючої системою часу роботи РЛС і передала повідомлення на засіб ураження; $V1 = 2$ – час роботи РЛС, встановлений інформаційно-керуючої системою, закінчився, а радіолокаційна система по ЦВ не виявила БпЛА. Початкове значення $V1 = 0$.

Компонента вектора станів $V2$ – «показує» стан оптико-електронної системи. Значення компоненти: $V2 = 0$ – оптико-електронна система очікує команду від ІКС «розпочати роботу» і ЦВ; $V2 = 1$ – оптико-електронна система по ЦВ виявила БпЛА до закінчення встановленого інформаційно-керуючої системою часу роботи ОЕС і передала повідомлення на засіб ураження; $V2 = 2$ – час роботи ОЕС, встановлений інформаційно-керуючої системою, закінчився, а ОЕС по ЦВ не виявила БпЛА. Початкове значення $V2 = 0$.

Компонента вектора станів $V3$ – «показує» стан акустичної системи. Значення компоненти: $V3 = 0$ – акустична система очікує команду від ІКС «розпочати роботу» і ЦВ; $V3 = 1$ – акустична система по

ЦВ виявила БпЛА до закінчення встановленого інформаційно-керуючою системою часу роботи АС і передала повідомлення на засіб ураження; $V3 = 2$ – час роботи АС, встановлений інформаційно-керуючою системою, закінчився, а акустична система по ЦВ не виявила БпЛА. Початкове значення $V3 = 0$.

Допоміжна компонента вектора станів $V4$ – «показує» відповідність фінальних станів показникам ефективності. Значення компоненти:

$V4 = 0$ – початкове значення;

$V4 = 1$ – АС виконала завдання за умови, що завдання виконали РЛС і ОЕС;

$V4 = 2$ – АС виконала завдання за умови, що завдання виконала РЛС і не виконала ОЕС;

$V4 = 3$ – АС виконала завдання за умови, що завдання не виконала РЛС і виконала ОЕС;

$V4 = 4$ – АС виконала завдання за умови, що завдання не виконала РЛС і не виконала ОЕС;

$V4 = 5$ – АС не виконала завдання за умови, що завдання виконали РЛС і ОЕС;

$V4 = 6$ – АС не виконала завдання за умови, що завдання виконала РЛС і не виконала ОЕС;

$V4 = 7$ – АС не виконала завдання за умови, що завдання не виконала РЛС і виконала ОЕС;

$V4 = 8$ – АС не виконала завдання за умови, що завдання не виконала РЛС і не виконала ОЕС.

1.5. Показники ефективності систем, які включені в склад радіоелектронного комплексу і які будуть представлені в стохастичній моделі його експлуатаційної функційної поведінки

1) P_{RL} – ймовірність виконання завдання з використанням РЛС;

2) $(1 - P_{RL})$ – ймовірність невиконання завдання з використанням РЛС в дальній контрольованій зоні. БпЛА зайшов в середню контрольовану зону;

3) T_{RL} – середнє значення інтервалів часу від моменту входу БпЛА в дальню контрольовану зону до моменту його виявлення РЛС або до закінчення часу роботи РЛС, що був призначений (відведений, заданий) ІКС на виявлення БпЛА в дальній контрольованій зоні;

4) P_{OE} – ймовірність виконання завдання з використанням ОЕС (в світлий час доби за наявності видимості);

5) $(1 - P_{OE})$ – ймовірність невиконання завдання з використанням ОЕС;

6) T_{OE} – середнє значення тривалостей роботи ОЕС; час роботи ОЕС задає ІКС; середнє значення інтервалів часу від моменту виявлення БпЛА радіолокаційною системою або від моменту входу БпЛА в середню контрольовану зону до моменту його виявлення ОЕС або до закінчення часу роботи ОЕС, що був призначений (відведений, заданий) ІКС на виявлення БпЛА в середній контрольованій зоні;

7) P_A – ймовірність виконання завдання з використанням АС;

8) $(1 - P_A)$ – ймовірність невиконання завдання з використанням АС;

9) T_A – середнє значення тривалостей роботи АС; час роботи АС задає ІКС; середнє значення інтервалів часу від моменту виявлення БпЛА оптично-електронною системою або від моменту входу БпЛА в ближню контрольовану зону до моменту його виявлення АС або до закінчення часу роботи АС, що був призначений (відведений, заданий) ІКС на виявлення БпЛА в ближній контрольованій зоні;

10) P_{TV} – ймовірність виконання завдання з використанням ТВС (в нічний час або за відсутності видимості);

11) $(1 - P_{TV})$ – ймовірність невиконання завдання з використанням ТВС;

12) T_{TV} – середнє значення тривалостей роботи ТВС; час роботи ТВС задає ІКС; середнє значення інтервалів часу від моменту виявлення БпЛА радіолокаційною системою або від моменту входу БпЛА в середню контрольовану зону до моменту його виявлення ТВС або до закінчення часу роботи ТВС, що був призначений (відведений, заданий) ІКС на виявлення БпЛА в середній контрольованій зоні.

1.6. Розроблення моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК у вигляді ймовірнісного графа станів і переходів

Згідно з технологією моделювання вербальну модель експлуатаційної функційної поведінки РЕК необхідно представити у вигляді ймовірнісного графа станів і переходів. Для розроблення ймовірнісного графа станів і переходів як моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу використана методика представлена в статті [25]. В таблиці 2 показано процес розроблення ймовірнісного графа станів і переходів. Колонки в таблиці 2 мають такі позначення та назви: **1** – номер кроку; **2** – ймовірність альтернативного завершення процедури (процесу); **3** – перша компонента вектора станів $V1$; **4** – друга компонента вектора станів $V2$; **5** – третя компонента вектора станів $V3$; **6** – четверта компонента вектора станів $V4$; **7** – номер стану графа; **8** – переходи з стану в стан графа; **9** – формула розрахунку інтенсивності переходів між станами графа.

Таблиця 2

Розроблення ймовірнісного графа станів і переходів

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Крок 1. Початковий стан ПС. Відбувається базова подія БПО: «Повідомлення (цілевказівка), передане системою РЕК і прийнята в ІКС»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	----	0	0	0	0	1	----	-----

Крок 2. Розглядається вектор стану 1, в якому РЛС виконувала свою функцію. Відбувається БП1: «Завершення роботи РЛС, яке може бути успішним або неуспішним»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	P_{RL}	1	0	0	0	2р.у	$1 \rightarrow 2р.у$	$P_{RL} \frac{1}{T_{RL}}$
	$1 - P_{RL}$	2	0	0	0	3р.н	$1 \rightarrow 3р.н$	$(1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}}$
<p><i>Коментар до кроку 2:</i> При успішному завершенні роботи РЛС у компоненти V1 змінюється значення з 0 на 1. При неуспішному завершенні роботи РЛС у компоненти V1 змінюється значення з 0 на 2.</p> <p>ЗАЗНАЧИМО, що тут і надалі формула розрахунку інтенсивності переходів між станами графа компонується у вигляді добутку відповідної ймовірності та інтенсивності базової події в експлуатаційній функційній поведінці РЕК.</p> <p>Використані позначення <i>читати так:</i> 2р.у – стан 2 графа показує, що РЛС виконала свою функцію успішно; 3р.н – стан 3 графа показує, що РЛС не виконала свою функцію.</p>								
Крок 3. Розглядається вектор стану 2р.у. в якому ОЕС виконувала свою функцію. Відбувається БП2: «Завершення роботи ОЕС, яке може бути успішним або неуспішним»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	P_{OE}	1	1	0	0	4о.у	$2р.у \rightarrow 4о.у$	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$
	$1 - P_{OE}$	1	2	0	0	5о.н	$2р.у \rightarrow 5о.н$	$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$
<p><i>Коментар до кроку 3:</i> При успішному завершенні роботи ОЕС у компоненти V2 змінюється значення з 0 на 1. При неуспішному завершенні роботи ОЕС у компоненти V1 змінюється значення з 0 на 2.</p> <p><i>Читати:</i> 4о.у – стан 4 графа показує, що ОЕС виконала свою функцію успішно; 5о.н – стан 5 графа показує, що ОЕС не виконала свою функцію.</p>								
Крок 4. Розглядається вектор стану 3р.н, в якому РЛС не виконала свою функцію. Відбувається БП2: «Завершення роботи ОЕС, яке може бути успішним або неуспішним»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	P_{OE}	2	1	0	0	6о.у	$3р.н \rightarrow 6о.у$	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$
	$1 - P_{OE}$	2	2	0	0	7о.н	$3р.н \rightarrow 7о.н$	$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$
<p><i>Коментар до кроку 4:</i> При успішному завершенні роботи ОЕС у компоненти V2 змінюється значення з 0 на 1. При неуспішному завершенні роботи ОЕС у компоненти V2 змінюється значення з 0 на 2.</p>								

Крок 5. Розглядається вектор стану 4, в якому ОЕС успішно виконала свою функцію. Відбувається базова подія БП3 «Завершення роботи АС, яке може бути успішним або неуспішним»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	P_A	1	1	1	1	8а.у	$4о.у \rightarrow 8а.у$	$P_A \frac{1}{T_A}$
	$1 - P_A$	1	1	2	5	9а.н	$4о.у \rightarrow 9а.н$	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$
<p><i>Коментар до кроку 5:</i> При успішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 1. Так як на цьому робота РЕК з черговим БпЛА завершена, то стан 8а.у є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 1. При неуспішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 2. Відповідно стан 9а.н також є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 5.</p> <p><i>Читати:</i> 8а.у – стан 8 графа показує, що АС виконала свою функцію успішно; 9а.н – стан 9 графа показує, що АС не виконала свою функцію.</p>								
Крок 6. Розглядається вектор стану 5, в якому ОЕС не виконала свою функцію. Відбувається БП3: «Завершення роботи АС, яке може бути успішним або неуспішним»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	P_A	1	2	1	2	10а.у	$5о.н \rightarrow 10а.у$	$P_A \frac{1}{T_A}$
	$1 - P_A$	1	2	2	6	11а.н	$5о.н \rightarrow 11а.н$	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$
<p><i>Коментар до кроку 6:</i> При успішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 1. Так як на цьому робота РЕК з черговим БпЛА завершена, то стан 10а.у є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 2. При неуспішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 2. Відповідно стан 11а.н також є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 6.</p>								
Крок 7. Розглядається вектор стану 6о.у, в якому ОЕС виконала свою функцію успішно. Відбувається БП3: «Завершення роботи АС, яке може бути успішним або неуспішним»								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	P_A	2	1	1	3	12а.у	$6о.у \rightarrow 12а.у$	$P_A \frac{1}{T_A}$
	$1 - P_A$	2	1	2	7	13а.н	$6о.у \rightarrow 13а.н$	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$

Коментар до кроку 7: При успішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 1. Так як на цьому робота РЕК з черговим БПЛА завершена, то стан 12а.у є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 3. При неуспішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 2. Відповідно стан 13а.н також є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 7.

Крок 8. Розглядається вектор стан у 7о.н, в якому ОЕС не виконала свою функцію. Відбувається БПЗ: «Завершення роботи АС, яке може бути успішним або неуспішним»

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	P_A	2	2	1	4	14а.у	7о.н → 14а.у	$P_A \frac{1}{T_A}$
	$1 - P_A$	2	2	2	8	15а.н	7о.н → 15а.н	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$

Коментар до кроку 8: При успішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 1. Так як на цьому робота РЕК з черговим БПЛА завершена, то стан 14а.у є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 4. При неуспішному завершенні роботи АС у компоненти V3 змінюється значення з 0 на 2. Відповідно стан 15а.н також є фінальним (поглинаючим) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 8.

Розроблений і показаний в таблиці 2 ймовірнісний граф станів і переходів згідно даних вербальної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу має 15 станів і 14 переходів між станами. Вхідні дані у вигляді вербальної моделі подані в пунктах 1.1 – 1.5.

2. Показники ефективності радіоелектронного комплексу виявлення БПЛА та компоненту формул для їх визначення

Для оцінювання ефективності радіоелектронного комплексу виявлення БПЛА будемо використовувати 2 показники. Це показник «ймовірність виявлення БПЛА» і показник «ймовірність невиявлення БПЛА». В цій роботі прийнято, що факт виявлення БПЛА фіксується у трьох варіантах часткового виконання завдання. У першому варіанті часткового виконання врахована частина БПЛА, які виявлено трьома системами. У другому варіанті часткового виконання завдання врахована частина БПЛА, які виявлено двома будь-якими системами із трьох. У третьому варіанті часткового виконання завдання врахована частина БПЛА, які виявлено будь-якою одною системою із трьох.

2.1. Визначення ймовірності виконання першого часткового завдання

Показник ефективності РЕК «ймовірність виконання першого часткового завдання» ($P_{ч.в.1}$) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), коли завдання виявлення БПЛА виконали три системи. Тобто цей показник треба визначати як умовну априорну ймовірність виявлення БПЛА з використанням АС за умови, що цей БПЛА виявлено з використанням РЛС та ОЕС. Значення ймовірності виконання першого часткового завдання РЕК «показує» в ймовірнісному графі станів і переходів ймовірність перебування в стані 8

$$P_{ч.в.1} = P(A|R, O) = P_8(t_e) \quad (1)$$

де A – подія «виявлення БПЛА з використанням АС»; R – подія «виявлення БПЛА з використанням РЛС»; O – подія «виявлення БПЛА з використанням ОЕС»; t_e – тривалість «спостереження» за роботою РЕК; $P_8(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 8-й стан ймовірнісного графа при тривалості «спостереження» t_e .

2.2. Визначення ймовірності виконання другого часткового завдання

Показник ефективності РЕК: «ймовірність виконання другого часткового завдання» ($P_{ч.в.2}$) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), коли завдання виявлення БПЛА виконано двома із трьох систем.

Значення для ймовірності виконання другого часткового завдання РЕК «показують» в ймовірнісному графі станів ймовірності перебування в станах 9, 10, 12. Тому значення ймовірності виконання другого часткового завдання РЕК визначається як сума таких складових:

а) умовна априорна ймовірність невиявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА виявлено з використанням РЛС та виявлено з використанням ОЕС

$$P_{ч.в.2.1} = P(\bar{A}|R, O) = P_9(t_e), \quad (2)$$

де \bar{A} – подія «невиявлення БПЛА з використанням АС»; $P_9(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 9-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e .

б) умовна априорна ймовірність виявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА виявлено з використанням РЛС, але не виявлено з використанням ОЕС

$$P_{ч.в.2.2} = P(A|R, \bar{O}) = P_{10}(t_e), \quad (3)$$

де A – подія «виявлення БПЛА з використанням АС»; R – подія «виявлення БПЛА з використанням РЛС»; \bar{O} – подія «невиявлення БПЛА з використанням ОЕС»; t_e – тривалість «спостереження» за роботою РЕК; $P_{10}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 10-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e ;

в) умовна априорна ймовірність виявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА не виявлено з використанням РЛС, але виявлено з використанням ОЕС

$$P_{ч.в.2.3} = P(A|\bar{R}, O) = P_{12}(t_e), \quad (4)$$

де \bar{R} – подія «невиявлення БПЛА з використанням РЛС»; O – подія «виявлення БПЛА з використанням ОЕС»; t_e – тривалість «спостереження» за роботою РЕК; $P_{12}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 12-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e .

Формула для визначення ймовірності виконання другого часткового завдання РЕК за розробленою стохастичною моделлю має такий вигляд

$$P_{ч.в.2} = P_9(t_e) + P_{10}(t_e) + P_{12}(t_e). \quad (5)$$

2.3. Визначення ймовірності виконання третього часткового завдання

Показник ефективності РЕК «ймовірність виконання третього часткового завдання» ($P_{ч.в.3}$) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), коли завдання виявлення БПЛА виконано однією із трьох систем. Тобто виконання завдання вважаємо частковим, якщо БПЛА виявлено однією системою РЕК. Значення для ймовірності виконання третього часткового завдання РЕК «показують» в ймовірнісному графі станів ймовірності перебування в станах 11, 13, 14. Тому значення ймовірності виконання третього часткового завдання РЕК визначається як сума таких складових:

а) умовна апіорна ймовірність невиявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА виявлено з використанням РЛС, але не виявлено з використанням ОЕС

$$P_{ч.в.3.1} = P(\bar{A}|R, \bar{O}) = P_{11}(t_e), \quad (6)$$

де $P_{11}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 11-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e ;

б) умовна апіорна ймовірність невиявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА не виявлено з використанням РЛС, але виявлено з використанням ОЕС

$$P_{ч.в.3.2} = P(\bar{A}|\bar{R}, O) = P_{13}(t_e), \quad (7)$$

де $P_{13}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 13-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e ;

в) умовна апіорна ймовірність виявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА не виявлено з використанням РЛС та не виявлено з використанням ОЕС

$$P_{ч.в.3.3} = P(A|\bar{R}, \bar{O}) = P_{14}(t_e), \quad (8)$$

де $P_{14}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 14-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e .

Формула для визначення ймовірності виконання третього часткового завдання РЕК за розробленою стохастичною моделлю має такий вигляд

$$P_{ч.в.3} = P_{11}(t_e) + P_{13}(t_e) + P_{14}(t_e). \quad (9)$$

2.4. Показник ефективності РЕК «ймовірність виявлення БПЛА»

Показник ефективності РЕК «ймовірність виявлення БПЛА» (P_v) будемо визначати як суму ймовірностей першого, другого і третього часткових виконань завдання

$$P_{ч.в} = P_{ч.в.1} + P_{ч.в.2} + P_{ч.в.3}. \quad (10)$$

Формула для отримання значення показника «ймовірність виявлення БПЛА» радіоелектронним комплексом P_v за розробленою стохастичною моделлю має такий вигляд

$$P_v = P_8(t_e) + P_{10}(t_e) + P_{12}(t_e) + P_{14}(t_e) + P_9(t_e) + P_{11}(t_e) + P_{13}(t_e) \quad (11)$$

2.5. Показник ефективності РЕК «ймовірність невиявлення БПЛА»

Показник ефективності РЕК «ймовірність невиявлення БПЛА» ($P_{н.в}$) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), коли завдання виявлення БПЛА не виконує жодна із трьох систем. Тобто цей показник треба визначати як умовну апіорну ймовірність невиявлення БПЛА з використанням АС за умови, що БПЛА не виявлено з використанням РЛС і не виявлено з використанням ОЕС. Значення ймовірності невиконання завдання РЕК «показує» в графі станів ймовірність потрапляння в стан 15

$$P_{н.в} = P(\bar{A}|\bar{R}, \bar{O}) = P_{15}(t_e). \quad (12)$$

де $P_{15}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 15-й стан графа при тривалості «спостереження» t_e .

3. Стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БПЛА

На основі розробленого ймовірнісного графа станів і переходів сформована стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БПЛА у вигляді системи диференціальних рівнянь. Система диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена, яка представляє дискретно-неперервну стохастичну модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу, має такий вигляд

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t_e)}{dt_e} = - \left[P_{RL} \frac{1}{T_{RL}} + (1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}} \right] P_1(t_e) \\ \dots \\ \frac{dP_5(t_e)}{dt_e} = (1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}} P_2(t_e) - \left[P_A \frac{1}{T_A} + (1 - P_A) \frac{1}{T_A} \right] P_5(t_e) \\ \dots \\ \frac{dP_{10}(t_e)}{dt_e} = P_A \frac{1}{T_A} P_5(t_e) \\ \dots \\ \frac{dP_{15}(t_e)}{dt_e} = (1 - P_A) \frac{1}{T_A} P_7(t_e) \end{cases} \quad (13)$$

Результати розв'язання системи диференціальних рівнянь (13), а саме значення ймовірностей «попадання» у фінальні (поглинаючі) стани графа, використовуються (призначені) для формул визначення показників

ефективності РЕК виявлення БпЛА. Формули для визначення показників ефективності РЕК скомпоновані в пункті 2.

Валідація дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК виявлення БпЛА показана в статті [26].

4. Порівняння ефективності варіантів побудови радіоелектронного комплексу виявлення БпЛА

Вхідними даними для порівняльних досліджень є:

1) об'єктами виявлення є БпЛА трьох типів, а саме «Ланцет», «Shahed-136» і «Куб».

2) значення показників ефективності РЛС, ОЕС, ТВС і АС при автономному їх використанні:

а) ймовірності виявлення БпЛА типу «Ланцет»: $P_{RL} = 0,85$; $P_{OE} = 0,75$; $P_{TV} = 0,35$; $P_A = 0,9$;

б) ймовірності виявлення БпЛА типу «Shahed-136»: $P_{RL} = 0,9$; $P_{OE} = 0,9$; $P_{TV} = 0,9$; $P_A = 0,99$;

в) ймовірності виявлення БпЛА типу «Куб»: $P_{RL} = 0,85$; $P_{OE} = 0,5$; $P_{TV} = 0,3$; $P_A = 0,9$.

Дослідження виконані з використанням програмної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК, представленої в статті [26].

Для названих вище трьох типів БпЛА в таблицях 3 і 4 подано значення показників ефективності «ймовірність виявлення БпЛА» радіоелектронного комплексу з трьох систем в складі радіолокаційної системи, оптико-електронної системи (таблиця 3) або тепловізійної системи (таблиця 4) та акустичної системи. Разом з цим подано вклад в значення цього показника значень трьох часткових виконань завдання, описаних в пункті 2.

Таблиця 3

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом з трьох систем в складі радіолокаційної, оптико-електронної та акустичної систем

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА			Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі РЛС, ОЕС, АС			
	РЛС	ОЕС	АС	3+2+1	3 із 3	2 із 3	1 із 3
Ланцет	0,85	0,75	0,9	0,9962	0,5737	0,3562	0,0662
Shahed	0,9	0,9	0,99	0,9998	0,8019	0,1862	0,0117
Куб	0,85	0,5	0,9	0,9924	0,3825	0,4924	0,1175

Таблиця 4

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом з трьох систем в складі радіолокаційної системи, тепловізійної системи та акустичної системи

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА			Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі РЛС, ТВС, АС			
	РЛС	ТВС	АС	3+2+1	3 із 3	2 із 3	1 із 3
Ланцет	0,85	0,35	0,9	0,9902	0,2677	0,5742	0,14824
Shahed	0,9	0,9	0,99	0,9998	0,8018	0,1862	0,0117
Куб	0,85	0,3	0,9	0,9894	0,2294	0,6014	0,15849

Для заданих значень показників ефективності кожної з трьох систем, з яких буде формуватися склад радіоелектронного комплексу, результати виконаних розрахунків показують досяжний рівень його ефективності для виявлення БпЛА кожного типу.

В таблицях 5, 6, 7, 8 і 9 подані значення показників ефективності «ймовірність виявлення БпЛА» радіоелектронного комплексу з двох систем в складі: оптико-електронної та акустичної систем (таблиця 5); тепловізійної та акустичної систем (таблиця 6); радіолокаційної та оптико-електронної систем (таблиця 7); радіолокаційної та тепловізійної систем (таблиця 8); радіолокаційної та акустичної систем (таблиця 9).

Таблиця 5

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі оптико-електронної системи та акустичної системи

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА		Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі ОЕС та АС		
	ОЕС	АС	2+1	2 із 2	1 із 2
Ланцет	0,75	0,9	0,975	0,675	0,3
Shahed-136	0,9	0,99	0,999	0,891	0,108
Куб	0,5	0,9	0,950	0,45	0,5

Таблиця 6

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі тепловізійної системи та акустичної системи

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА		Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі ТВС та АС		
	ТВС	АС	2+1	2 із 3	1 із 3
Ланцет	0,35	0,9	0,935	0,315	0,62
Shahed-136	0,9	0,99	0,999	0,891	0,108
Куб	0,3	0,9	0,930	0,27	0,66

Таблиця 7

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі радіолокаційної системи та оптико-електронної системи

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА		Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі РЛС та ОЕС		
	РЛС	ОЕС	2+1	2 із 2	1 із 2
Ланцет	0,85	0,75	0,962	0,637	0,325
Shahed-136	0,9	0,9	0,990	0,81	0,18
Куб	0,85	0,5	0,925	0,425	0,5

Таблиця 8

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі радіолокаційної системи та тепловізійної системи

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА		Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі РЛС та ТВС		
	РЛС	ТВС	2+1	2 із 2	1 із 2
Ланцет	0,85	0,35	0,902	0,297	0,605
Shahed-136	0,9	0,9	0,990	0,81	0,18
Куб	0,85	0,3	0,895	0,255	0,64

Таблиця 9

Ефективність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі радіолокаційної системи та акустичної системи

Тип БпЛА	Експертна оцінка значень показників ефективності систем для виявлення БпЛА		Ймовірність виявлення БпЛА радіоелектронним комплексом в складі РЛС та АС		
	РЛС	АС	2+1	2 із 2	1 із 2
Ланцет	0,85	0,9	0,985	0,765	0,22
Shahed-136	0,9	0,99	0,999	0,891	0,108
Куб	0,85	0,9	0,985	0,765	0,22

За результатами розрахунків, поданих в таблицях 5, 6, 7, 8 і 9, радіоелектронні комплекси виявлення БпЛА в складі двох з чотирьох обраних систем не перевищують значення показників ефективності РЕК з трьома з чотирьох обраних систем. До значень показників ефективності радіоелектронного комплексу з трьома обраними системами найближчі показники ефективності має РЕК у складі радіолокаційної та акустичної систем. Зауважимо, що запропонована стохастична модель дає можливість визначити мінімальне значення показника ефективності однієї з двох систем РЕК для вибору системи, яка забезпечить задане значення показника ефективності РЕК.

В таблицях 10, 11, 12, 13 подані результати порівняння ефективності чотирьох варіантів формування радіоелектронних комплексів для виявлення БпЛА типу «Ланцет», «Shahed-136» та «Куб». Розглядаються варіанти формування радіоелектронних комплексів з використанням в їх складі РЛС, ОЕС і АС із заданими значеннями показників ефективності при автономному їх застосуванні. Підвищення ефективності використання радіоелектронного комплексу виявлення БпЛА оцінюємо відношенням значень ймовірності невиявлення БпЛА одною системою при автономному її застосуванні і ймовірності невиявлення БпЛА радіоелектронним комплексом.

Таблиця 10

Порівняння ефективності варіантів формування радіоелектронних комплексів виявлення БпЛА з включенням в їх склад РЛС, ОЕС і АС із заданими значеннями показників ефективності цих систем при автономному їх використанні

Тип БпЛА	Значення показника «ймовірність невиявлення БпЛА» радіоелектронними комплексами з різним складом систем				Значення показника «ймовірність невиявлення БпЛА» одною системою при автономному її використанні		
	РЛС+ОЕС+АС	ОЕС+АС	РЛС+ОЕС	РЛС+АС	РЛС	ОЕС	АС
Ланцет	0,003767	0,025	0,038	0,015	0,15	0,25	0,1
Shahed-136	0,000121	0,001	0,010	0,001	0,1	0,1	0,01
Куб	0,007517	0,050	0,075	0,015	0,15	0,5	0,1

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Ланцет» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ОЕС, ОЕС+АС і РЛС+ОЕС+АС в порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ОЕС, або АС показано в таблиці 11.

Таблиця 11

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Ланцет» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ОЕС, ОЕС+АС і РЛС+ОЕС+АС в порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ОЕС, або АС

Автономне використання системи	Варіанти складу радіоелектронного комплексу виявлення			
	РЛС+ОЕС+АС	ОЕС+АС	РЛС+ОЕС	РЛС+АС
заміна РЛС на ...	в 39,5 разу	в 6 разів	в 4 рази	в 10 разів
заміна ОЕС на ...	в 65,8 разу	в 10 разів	в 6,6 разів	в 16,7 разів
заміна АС на ...	в 23,6 разу	в 4 разів	в 2,6 разів	в 6,7 разів

В таблиці 12 показано підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Shahed-136» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ОЕС, ОЕС+АС і РЛС+ОЕС+АС в порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ОЕС, або АС.

Таблиця 12

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Shahed-136» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ОЕС, ОЕС+АС і РЛС+ОЕС+АС в порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ОЕС, або АС

Автономне використання системи	Варіанти складу радіоелектронного комплексу виявлення			
	РЛС+ОЕС+АС	ОЕС+АС	РЛС+ОЕС	РЛС+АС
заміна РЛС на ...	в 833,3 разу	в 100 разів	в 10 разів	в 100 разів
заміна ОЕС на ...	в 833,3 разу	в 100 разів	в 10 разів	в 100 разів
заміна АС на ...	в 83,3 разу	в 10 разів	немає	в 10 разів

Заміна радіолокаційної системи, або оптико-електронної системи, або акустичної системи будь-яким з названих радіоелектронних комплексів забезпечує підвищення ефективності виявлення БпЛА. Однак якщо замінити використання акустичної системи на радіоелектронний комплекс у складі РЛС+ОЕС, підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Shahed-136» не отримаємо. Зазначимо, що цей висновок має частковий характер і є справедливим для заданих значень показників ефективності цих систем.

В таблиці 13 показано підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Куб» від використання радіоелектронних комплексів у складі РЛС+АС, РЛС+ОЕС, ОЕС+АС і РЛС+ОЕС+АС у порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ОЕС, або АС

Таблиця 13

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Куб» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ОЕС, ОЕС+АС і РЛС+ОЕС+АС у порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ОЕС, або АС

Автономне використання системи	Варіанти складу радіоелектронного комплексу виявлення			
	РЛС+ОЕС+АС	ОЕС+АС	РЛС+ОЕС	РЛС+АС
заміна РЛС на ...	в 20 разів	в 3 рази	в 2 рази	в 10 разів
заміна ОЕС на ...	в 66,7 разу	в 10 разів	в 6,7 разу	в 33,3 разу
заміна АС на ...	в 13,3 разу	в 2 рази	в 1,3 разу	в 6,7 разу

В таблицях 14, 15, 16, 17 подані результати порівняння ефективності чотирьох варіантів формування радіоелектронних комплексів виявлення БпЛА типу «Ланцет», «Shahed-136» та «Куб». Розглядаються варіанти формування радіоелектронних комплексів з використанням в їх складі РЛС, ТВС і АС із заданими значеннями показників ефективності при автономному їх використанні.

Таблиця 14

Порівняння ефективності варіантів формування радіоелектронних комплексів виявлення БпЛА з включенням в їх склад РЛС, ТВС і АС із заданими значеннями показників ефективності цих систем при автономному їх використанні

Тип БпЛА	Значення показника «ймовірність невиявлення БпЛА» радіоелектронними комплексами з різним складом систем				Значення показника «ймовірність невиявлення БпЛА» одною системою при автономному її використанні		
	РЛС+ТВС+АС	ТВС+АС	РЛС+ТВС	РЛС+АС	РЛС	ТВС	АС
Ланцет	0,00976	0,065	0,098	0,015	0,15	0,65	0,1
Shahed-136	0,00012	0,001	0,010	0,001	0,1	0,1	0,01
Куб	0,01051	0,07	0,105	0,015	0,15	0,7	0,1

Таблиця 15

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Ланцет» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ТВС, ТВС+АС і РЛС+ТВС+АС у порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ТВС, або АС

Автономне використання системи	Варіанти складу радіоелектронного комплексу виявлення			
	РЛС+ТВС+АС	ТВС+АС	РЛС+ТВС	РЛС+АС
заміна РЛС на ...	в 15,3 разу	в 2,3 разу	в 1,5 разу	в 10 разів
заміна ТВС на ...	в 66,3 разу	в 10 разів	в 6,6 разу	в 43,3 разу
заміна АС на ...	в 10,2 разу	в 1,5 разу	немає	в 6,7 разу

Таблиця 16

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Shahed-136» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ТВС, ТВС+АС і РЛС+ТВС+АС у порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ТВС, або АС

Автономне використання системи	Варіанти складу радіоелектронного комплексу виявлення			
	РЛС+ТВС+АС	ТВС+АС	РЛС+ТВС	РЛС+АС
заміна РЛС на ...	в 833,3 разу	в 100 разів	в 10 разів	в 100 разів
заміна ТВС на ...	в 833,3 разу	в 100 разів	в 10 разів	в 100 разів
заміна АС на ...	в 83,3 разу	в 10 разів	немає	в 10 разів

Таблиця 17

Підвищення ефективності виявлення БпЛА типу «Куб» від використання радіоелектронних комплексів в складі РЛС+АС, РЛС+ТВС, ТВС+АС і РЛС+ТВС+АС у порівнянні з ефективністю автономного використання РЛС, або ТВС, або АС

Автономне використання системи	Варіанти складу радіоелектронного комплексу виявлення			
	РЛС+ТВС+АС	ТВС+АС	РЛС+ТВС	РЛС+АС
заміна РЛС на ...	в 14,3 разу	в 2,1 разу	в 1,4 разу	в 10 разів
заміна ТВС на ...	в 66,6 разу	в 10 разів	в 6,6 разу	в 46,6 разу
заміна АС на ...	в 9,5 разу	в 1,4 разу	немає	в 6,6 разу

Висновки

1. Отримані результати порівняння ефективності восьми варіантів формування радіоелектронних комплексів для виявлення БпЛА типу «Ланцет», «Shahed-136» та «Куб». В цих варіантах розглянуто два радіоелектронних комплекси, в яких передбачено поєднання трьох систем, і шість радіоелектронних комплексів, в яких передбачено поєднання двох систем.

2. Для оцінювання ефективності радіоелектронного комплексу виявлення безпілотних літальних апаратів кожного типу використано показник «ймовірність виявлення БПЛА». Факт виявлення БПЛА фіксується у трьох варіантах часткового виконання завдання. У першому варіанті часткового виконання завдання враховані безпілотні літальні апарати, які виявлено трьома системами. У другому варіанті часткового виконання завдання враховані безпілотні літальні апарати, які виявлено двома будь-якими системами із трьох. У третьому варіанті часткового виконання завдання враховані безпілотні літальні апарати, які виявлено будь-якою одною системою із трьох.

3. Для оцінювання підвищення ефективності створених радіоелектронних комплексів виявлення БПЛА використано показник у вигляді відношення значень ймовірності невиявлення БПЛА одною системою при автономному її застосуванні і ймовірності невиявлення БПЛА створеним радіоелектронним комплексом.

4. Для визначення показника ефективності запропонована дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу в складі радіолокаційної, оптикоелектронної або тепловізійної та акустичної систем із заданим алгоритмом його функціонування. Показано розроблення ймовірнісного графа станів і переходів, на основі якого сформована стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БПЛА у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена. Запропонована дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу дає змогу розв'язувати задачі аналізу і задачі синтезу.

5. Ступінь адекватності запропонованої дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу визначає урахування показників ефективності систем, що входять (включені) в його склад. В якості показників ефективності систем використані «ймовірності виявлення БПЛА системою радіоелектронного комплексу коли БПЛА перебуває у контрольованій цією системою зоні» та «середні значення інтервалів часу від моменту появи БПЛА в контрольованій зоні до моменту їх виявлення відповідною системою».

6. Продовження досліджень за тематикою, започаткованій (показаній) в статті, передбачає вирішення таких задач:

а) формування методик визначення показників ефективності систем виявлення різних типів БПЛА, що планується (заплановано) включати в склад радіоелектронного комплексу з урахуванням особливостей місцевості, на якій має працювати радіоелектронний комплекс;

б) розроблення стохастичних моделей експлуатаційної функційної поведінки РЕК: з іншими варіантами алгоритму функціонування радіоелектронного комплексу; з іншими умовами перетину БПЛА контрольованих зон; з іншими варіантами вибору типу систем, які будуть включені в склад радіоелектронного комплексу;

в) у запропонованій стохастичній моделі експлуатаційної функційної поведінки систем для тривалостей виконання завдання окремими системами (для тривалостей перебування в станах ймовірнісного графа) використано експоненційний закон розподілу; з урахуванням того, що визначене на такій моделі значення показника ефективності РЕК відповідає граничному верхньому або граничному нижньому значенню, необхідно зняти цю невизначеність.

Список літератури

1. ВП 3-00(116)120 Методичні рекомендації “Загальновійськовим підрозділам щодо боротьби з ударними БПЛА іранського виробництва “Shahed-136” (“Герань-2”) та рф “Ланцет-2” (за досвідом російсько-української війни 2022-2023 років). *Військова навчально-методична публікація командирам (начальникам) до використання під час виконання завдань*. Березень 2023. Обмежень для розповсюдження немає. Вид. 1. – Київ: Центр оперативних стандартів і методики підготовки ЗС України спільно з Головним управлінням доктрин та підготовки Генерального штабу Збройних Сил України. 76с.

2. Електронний ресурс URL: <https://armyinform.com.ua/2022/07/07/zbroya-voroga-shho-vidomo-pro-rosijski-drony-kamikadze-lanczet/>, (дата звернення: 15.09.2023)].

3. Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105 (in russian)

4. Makarenko S. I., Timoshenko A. V. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 2. Rocket and Artillery Fire, Physical Interception. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106 (in russian).

5. “Counter-drone systems”, 2nd Edition, Arthur Holland Michel, December 2019. Access mode: <https://www.calameo.com/read/000009779458ad0134023>, Date of access: 17.08.2023.

6. C. D. Vyshnevsky, L. V. Beilis, & V. Y. Klimchenko, "Potential capabilities of radar systems of radio engineering troops to detect operational and tactical unmanned aerial vehicles", *Science and Technique of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2017, № 2, pp. 92-98. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_2_21

7. V. Kartashov, V. Pososhenko, V. Voronin, V. Kolesnik, A. Kapusta, N. Rybnikov & E. Pershin, (2021). Methods for detection-recognition of radar, acoustic, optical and infrared signals of unmanned aerial vehicles. *Radiotekhnika*, 2(205), pp. 138-153, doi: 10.30837rt.2021.2.205.15

8. “Questions to Ask When Researching Counter Unmanned Aerial Systems”, U.S. Department of Homeland Security Science and Technology Directorate, 2019. Access

mode: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/c-uas-responder-qs-poster_20august2020_final.pdf

9. A.O. Herasymenko, S.Ya. Zhuk, "Analysis of the Efficiency of the Kalman-Type Correlation Algorithm for Tracking of a Small UAV in the Presence of Uncorrelated Interference", *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*, *visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, (87), pp. 22-29, doi: 10.20535/RADAP.2021.87.22-29. Access mode: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56163/1/1754-4994-1-10-20211230.pdf> Date of access: 17.08.2023.

10. V.M. Sineglazov, "Complex structure of UAVs detection and identification", *Electronics and Control Systems, Kyiv, Aviation Computer-Integrated Complexes Department, National Aviation University*, 2015, № 3(45), pp. 28-32, doi:10.1109/ICICSP.2018.8549736. ISSN 1990-5548. Access mode: svm@nau.edu.ua

11. V.I. Chyhin, M.M. Protsenko, Y.V. Shabatura, and M.V. Buhaiiov, "Improvement of the method of detecting unmanned aerial vehicles based on the results of spectral analysis of acoustic signals", *Military Technical Digest*, 2019, (20), pp. 58-63, doi: 10.33577/2312-4458.20.2019.58-63

12. A. Saravanakumar, K. Senthilkumar, "Exploitation of Acoustic signature of low flying Aircraft using Acoustic Vector sensor", *Defence Science Journal*, March 2014, vol. 64, No. 2, pp. 95-98, doi: 10.14429/dsj.64.3924

13. S. Sadasivan, M. Gurubasavaraj, and S. Ravi Sekar, "Acoustic Signature of an Unmanned Air Vehicle – Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation", *Eronautical DEF SCI J*, 2001, vol. 51, N. 3, pp. 279-283, doi: 10.14429/dsj.51.2238

14. T. Pham, N. Srour, "TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs" U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE, 2004, vol. 5417, pp. 24-29, doi:10.1117/12.548194

15. Y.G. Danik, I.V. Puleko, & M.V. Bugayev, "Detection of unmanned aerial vehicles based on the analysis of acoustic and radar signals", *Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical sciences*, 2014, № 4, pp. 71-80. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2014_4_13

16. F. Svanström, C. Englund and F. Alonso-Fernandez, "Real-Time Drone Detection and Tracking With Visible, Thermal and Acoustic Sensors", 2020, 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2021, pp. 7265-7272, doi: 10.1109/ICPR48806.2021.9413241. Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9413241&isnumber=9411911>

17. W. Shi, G. Arabadjis, B. Bishop, P. Hill, R. Plasse and J. Yoder, "Detecting, Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence", in book: *Sensor Fusion – Foundation and Applications*, 2011, pp. 139-158, doi: 10.5772/17666

18. C. Kouhestani, B. Woo, and G. Birch, "Counter unmanned aerial system testing and evaluation methodology", Proc. SPIE 10184, *Sensors, and Command, Control, Communicatons, and Intelligtncce (C3I) Technologies for Homeland Security, Defence, and Law Enforcement Applications XVI*, 1018408 (5 May 2017); doi: 10.1117/12.2262538

19. Y.G. Danik, M.V. Bugayev, "Analysis of the efficiency of detection of tactical unmanned aerial vehicles by passive and active surveillance means", *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems*, 2015, vol. 10, pp. 5-20. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Psvz_2015_10_3

20. V.P. Belyaev, B.Yu. Volochiy, A.V. Grabchak, M.V. Miskiv, & L.D. Ozirkovsky, "Modeling and evaluation of the efficiency of a local radio-electronic complex", *Information Selection and Processing. National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 13 (89), Lviv, 1999, pp. 65-70.

21. O. Shkiliuk, B. Volochiy, and I. Petliuk, "Discrete-Continuous Stochastic Model of Behavior Algorithm of Surveillance and Target Acquisition System", Proceedings of the 15th International Conference on *ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer*, volume II, Kherson, Ukraine, June 12 – 15, 2019, pp. 761-776.

22. Yu. Salnyk, B. Volochiy, and V. Onishchenko, "Stochastic model of the reaction the unattended ground sensor system based on {3+3} scheme", Proceedings of 15th International Conference on *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020)*, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29.2020, pp. 496-501, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235482

23. Yu.P. Salnyk, B.Yu. Volochiy, "Stochastic model of functional behavior of the security system of a critical infrastructure facility", *Modern Information Systems*, Vol. 5, No. 1, Kharkiv, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2021, pp. 18-33, doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.03 Режим доступу: <https://is.lpnu.ua/ScienceLP/Research/ArticlesEdit.aspx?id=78535>

24. Волочій Б. Ю., Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем, Львів, Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004, 220 с.

25. D.V. Fedasyuk, S.B. Volochiy, "Methodology for developing structural-automatic models of fault-tolerant systems with alternative continuations of random processes after control, switching and recovery procedures", *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" "Computer Science and Information Technology"*, Lviv Polytechnic National University Press, 2017, № 864, pp. 49-62.

26. Волочій Б., Онищенко В., Озірковський Л. Програмна аналітична стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення безпілотних літальних апаратів. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Національний університет «Львівська політехніка». Львів: НУ «ЛП», 2023. Вип. 3, № 2, С. 126-149.

References

1. VP 3-00(116)120 (2023) Methodological recommendations for "General military units on combating Iranian-made Shahed-136" ("Geran-2") and Russian "Lancet-2" attack UAVs (based on the experience of the Russian-Ukrainian war 2022-2023). [Metodychni rekomendatsiyi "Zaha-l'noviys'kovym pidrozdilam shchodo borot'by z udarnymy BpLA irans'koho vyrobnytstva "Shahed-136" ("Heran'-2") ta rf "Lantset-2" (za dosvidom rosiys'ko-Ukrayins'koyi viyny 2022-2023 rokiv)] *Military educational and methodical publication for commanders (chiefs) for use during tasks. March 2023*. There are no restrictions on distribution. Kind. 1. – Kyiv: Center for Operational Standards and Training Methods of the Armed Forces of Ukraine together with the Main Department of Doctrine and Training of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine. 76c. [in Ukrainian].

2. Electronic resource [Elektronnyy resurs] URL: <https://armyinform.com.ua/2022/07/07/zbroya-voroga-shhovidomo-pro-rosijski-drony-kamikadze-lanczet/>, (access date: 15.09.2023). [in Ukrainian].

3. Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. (2020) Counter Unmanned Aerial Vehicles. [Protydiya bezpilotnym lital'nym aparatam] Part 1. Unmanned aerial

vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*, No. 1, pp. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105 (in russian).

4. Makarenko S. I., Timoshenko A. V. (2020). Counter Exploitation for Aircraft Localisation and Parameter Estimation [Akustychna syhnatura bezpilotnoho lital'noho aparatu – vykorystannya dlya lokalizatsiyi litaka ta otsinky parametriv], *Eronautical DEF SCI J*, vol. 51, No. 3, pp. 279-283, doi:10.14429/dsj.51.2238 [in India]

5. T. Pham, N. Srour (2004) TTCP AG-6: Acoustic detection and tracking of UAVs [Akustychne vvyavlennya ta vidstezhennya BPLA], *U.S. Army Research Laboratory. Proc. of SPIE*, vol. 5417, pp. 24-29, doi:10.1117/12.548194 [in USA].

6. Y.G. Danik, I.V. Puleko, & M.V. Bugayev, (2014) Detection of unmanned aerial vehicles based on the analysis of acoustic and radar signals [Vvyavlennya bezpilotnykh lital'nykh aparativ na osnovi analizu akustychnykh ta radiolokatsiynykh syhnaliv], *Bulletin of Zhytomyr State Technological University. Series: Technical sciences*, No. 4, pp. 71-80. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2014_4_13 [in Ukrainian].

7. F. Svanström, C. Englund and F. Alonso-Fernandez, (2021) Real-Time Drone Detection and Tracking With Visible, Thermal and Acoustic Sensors [Vvyavlennya ta vidstezhennya droniv u real'nomu chasi za dopomohoyu vydymykh, teplovykh i akustychnykh datchykyv], *25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 7265-7272, doi: 10.1109/ICPR48806.2021.9413241. Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9413241&isnumber=9411911> [in Italy].

8. W. Shi, G. Arabadjis, B. Bishop, P. Hill, R. Plasse and J. Yoder (2011) Detecting, Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence [Detecting, Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence], in book: *Sensor Fusion – Foundation and Applications*, pp. 139-158, doi: 10.5772/17666 [in USA].

9. C. Kouhestani, B. Woo, and G. Birch (2017) Counter unmanned aerial system testing and evaluation methodology [Testuvannya ta otsinka protydyi bezpilotnym lital'nym systemam], *Proc. SPIE 10184, Sensors, and Command, Control, Communicatons, and Intellignce (C3I) Technologies for Homeland Security, Defence, and Law Enforcement Applications XVI*, 1018408 (5 May 2017); doi: 10.1117/12.2262538 [in USA].

10. Y. G. Danik, M. V. Bugayev (2015) Analysis of the efficiency of detection of tactical unmanned aerial vehicles by passive and active surveillance means [Analiz efektyvnosti vvyavlennya taktychnykh bezpilotnykh lital'nykh aparativ zasobamy pasyvnoho ta aktyvnoho sposterezhennya], *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems*, 2015, vol. 10, pp. 5-20. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Psvz_2015_10_3 [in Ukrainian].

11. V. P. Belyaev, B. Yu. Volochiy, A. V. Grabchak, M. V. Miskiv, & L. D. Ozirkovsky (1999) Modeling and evaluation of the efficiency of a local radio-electronic complex [Modelyuvannya ta otsinka efektyvnosti lokal'noho

radioelektronnoho kompleksu], *Information Selection and Processing. National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 13 (89), Lviv, pp. 65-70. [in Ukrainian].

12. O. Shkiliuk, B. Volochiy, and I. Petliuk (2019) Discrete-Continuous Stochastic Model of Behavior Algorithm of Surveillance and Target Acquisition System [Dyskretno-neperervna stokhastychna model' alhorytmu povedinky systemy sposterezhennya ta tsil'ovoho zakhoplennya], *Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer*, volume II, Kherson, Ukraine, June 12 – 15, 2019, pp. 761-776. [in Ukrainian].

13. Yu. Salnyk, B. Volochiy, and V. Onishchenko (2020) Stochastic model of the reaction the unattended ground sensor system based on {3+3} scheme [Stokhastychna model' reaktsiyi systemy neobsluhovuvanykh nazemnykh datchykyv na osnovi skhemy {3+3}], *Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020)*, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25 29.2020, pp. 496-501, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235482 [in Ukrainian].

14. Yu. P. Salnyk, B. Yu. Volochiy (2021) Stochastic model of functional behavior of the security system of a critical infrastructure facility [Stokhastychna model' funktsional'noyi povedinky systemy bezpeky ob'yekta krytychnoyi infrastruktury], *Modern Information Systems*, Vol. 5, No. 1, Kharkiv, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", pp. 18-33, doi: 10.20998/2522-9052.2021.1.03 Режим доступу: <https://is.lpnu.ua/ScienceLP/Research/ArticlesEdit.aspx?id=78535> [in Ukrainian].

15. B. Yu. Volochiy (2004) Technology of modeling algorithms of behavior of information systems [Tekhnolohiya modelyuvannya alhorytmiv povedinky informatsiynykh system], *Lviv, Lviv Polytechnic National University Press*, 220 p. [in Ukrainian].

16. D. V. Fedasyuk, S. B. Volochiy (2017) Methodology for developing structural-automatic models of fault-tolerant systems with alternative continuations of random processes after control, switching and recovery procedures [Metodolohiya rozrobky strukturno-avtomatychnykh modeley vidmovostiykykh system z al'ternatyvnym prodovzhennyam vypadkovykh protsesiv pislya protsedur keruvannya, peremykannya ta vidnovlennya], *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" "Computer Science and Information Technology"*, Lviv Polytechnic National University Press, 2017, № 864, pp. 49-62. [in Ukrainian].

17. Volochiy B. Yu., Onyshchenko V. A., Ozirkovskyy L. D. (2023) Program analytical stochastic model of the operational functional behavior of the radio-electronic complex of detection of unmanned aerial vehicles [Prohramna analitychna stokhastychna model' ekspluatatsiynoi funktsional'noyi povedinky radioelektronnoho kompleksu vvyavlennya bezpilotnykh lital'nykh aparativ] *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering Infokomunikatsiyi tekhnolohiyi ta elektronna inzheneriya*. Vyp. 3, No. 2, pp. 126 - 149. [in Ukrainian].

RESEARCHING OPPORTUNITIES TO IMPROVE EFFICIENCY DETECTION OF UNMANNED

AERIAL VEHICLES

B. Volochiy, V. Onyshchenko, L. Ozirkovskyi, V. Khahyla

The article considers options for the formation of radio electronic systems for detecting UAVs using radar, optoelectronic, thermal imaging and acoustic systems with specified values of performance indicators in their autonomous use. The results of comparing the effectiveness of eight variants of the formation of electronic systems for detecting UAVs of the Lancet, Shahed-136, and Cube types are shown. In these variants, two electronic complexes are considered, which provide for the combination of 3 systems, and 6 electronic complexes, which provide for the combination of two systems. To evaluate the effectiveness of the radio electronic complex for

detecting unmanned aerial vehicles of each type, the indicator "probability of UAV detection" is used. The fact of UAV detection is recorded in three variants of partial task completion. The first embodiment of the partial solution of the task takes into account unmanned aerial vehicles detected by three systems. The second embodiment of the task takes into account unmanned aerial vehicles detected by any two of the three systems. The third variant of the partial solution of the task takes into account unmanned aerial vehicles detected by any one system out of three. To determine the performance indicator, a discrete-continuous stochastic model of the operational functional behavior of an electronic complex consisting of radar, optoelectronic or thermal imaging and acoustic systems with a given algorithm for its functioning is proposed. The development of a probabilistic graph of states and transitions is shown, on the basis of which a stochastic model of the operational functional behavior of the UAV detection electronic complex is formed in the form of a system of Kolmogorov-Chopman differential equations. The degree of adequacy of the proposed discrete-continuous stochastic model of the operational functional behavior of the electronic complex is determined by taking into account the performance indicators of the systems that are part of it. As indicators of system efficiency, we used "the probability of detecting a UAV by the system of the electronic complex when the UAV is in the area controlled by this system" and "the average values of the time intervals from the moment of UAV appearance in the controlled area until the moment of its detection by the corresponding system". To evaluate the increase in the efficiency of the created UAV detection electronic systems, an indicator is used in the form of the ratio of the probability of non-detection of UAVs by one system when it is used autonomously and the probability of non-detection of UAVs by the created electronic system.

Keywords: unmanned aerial vehicle complex, unmanned aerial vehicles, air target detection, UAV detection electronic complex, operational behavior of the complex, discrete-continuous stochastic model of operational behavior.

УДК 621.396.67 (045)

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.26-33>

І.П. Кіріс¹, Є.В. Рижов², М.В. Мороз¹, М.А. Дєдов¹, Є.В. Пелешок¹, І.М. Старинський³

¹Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, м. Київ

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

³Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ

Article history: Received 30 May 2023; Revised 31 May 2023; Accepted 30 September 2023

СИНТЕЗ МОБІЛЬНОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ 40–500 МГц

Синтезовано мобільну логоперіодичну вібраторну антену (далі – мобільна ЛПА) для роботи з широко-смуговими сигналами в діапазоні частот 40–500 МГц. Проведено розрахунок геометричних розмірів антени. За допомогою програмного продукту MMANA-GAL проведено розрахунок діаграми направленості антени та визначено основні її технічні характеристики (вхідний опір, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт направленої дії). Розглянуто особливості конструктивної побудови синтезованої антени, особливості її розгортання на місцевості, згортання у транспортне положення та експлуатації. Під час проведення експериментальних випробувань визначено час розгортання антени та час її згортання у транспортне положення. Проведено порівняльний аналіз кількісних і якісних показників синтезованої мобільної ЛПА з її аналогами.

Ключові слова: радіомоніторинг, радіоелектронний засіб, логоперіодична вібраторна антена, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт направленої дії.

Постановка проблеми

Сьогодні ефективність системи управління військами та озброєнням стала таким самим фактором перемоги в бою, як і їх кількість та якість. В сучасних умовах управління військами та озброєнням практично повністю засноване на використанні різних радіоелектронних засобів, що в свою чергу дозволило

збільшити ефективність вогневого ураження сил та засобів протиторчої сторони та значно підвищити якість управління військами. Слід зазначити, що в усіх арміях розвинених країн світу питанню порушення роботи системи управління військами та озброєнням протиторчої сторони приділяється досить велика увага.

Перш ніж знищити радіоелектронні засоби противника, потрібно швидко та ефективно виявити їх