



ПРОГРАМНА АНАЛІТИЧНА СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ФУНКЦІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСУ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Б. Волочій¹ [ORCID: 0000-0001-5230-9921], В. Онищенко² [ORCID: 0000-0003-3486-1223], Л. Озірковський¹ [ORCID: 0000-0003-0012-2908]

¹ Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

² Національна академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного,
вул. Героїв Майдану, 32, Львів, Україна

Відповідальний за рукопис: Богдан Волочій (e-mail: bohdan.y.volochii@lpnu.ua).

(Подано 28 серпня 2023 року)

Розглянуто радіоелектронний комплекс виявлення безпілотних літальних апаратів, до складу якого входять: радіолокаційна система, оптико-електронна система, тепловізійна система і акустична система. В інформаційній технології розроблення програмної дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної поведінки радіоелектронного комплексу важливим етапом є створення структурно-автоматної моделі. Створення структурно-автоматної моделі в статті описано в такій послідовності: вибраний алгоритм функціонування радіоелектронного комплексу; вербальна модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу; згідно із вербальною моделлю висвітлено розроблення опорного графа станів і переходів; на основі опорного графа станів і переходів сформовано структурно-автоматну модель експлуатаційної поведінки; вказано на необхідність верифікації розробленої структурно-автоматної моделі. Поеднання структурно-автоматної моделі експлуатаційної поведінки з програмним модулем АСНА-2 утворює програмну стохастичну модель. Програмна стохастична модель призначена для розв’язання задач системотехнічного проектування (аналізу та синтезу) радіоелектронного комплексу. Структурно-автоматна модель дає змогу проєктанту задавати будь-які значення показників ефективності систем, які входять до складу радіоелектронного комплексу. Програмний модуль АСНА-2 автоматизує побудову графів станів на основі структурно-автоматної моделі; відповідно до графа станів здійснює формування і розв’язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. За допомогою валідації програмної стохастичної моделі здійснено перевірку достовірності результатів, які отримав проєктант.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; виявлення повітряних цілей; радіоелектронний комплекс виявлення БпЛА; експлуатаційна поведінка комплексу; структурно-автоматна модель експлуатаційної поведінки; дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної поведінки; валідація стохастичної моделі.

УДК: 629.039.58, 621.396.9

1. Вступ

Проблема створення засобів боротьби з безпілотними літальними апаратами (БпЛА) привертає велику увагу. Про це свідчить довідник [1], в якому подано 537 засобів боротьби з БпЛА із 38 країн світу. Згідно із наведеними даними, засоби боротьби поділяють на засоби виявлення,

засоби ураження та засоби, в яких поєднано функції виявлення та ураження. Зауважимо, що в нашій статті об'єктом розгляду є засоби виявлення БпЛА. Згідно із наведеними в довіднику даними розробленням та виготовленням засобів боротьби з БпЛА в світі займаються 277 фірм. В довіднику подано засоби виявлення, що являють собою як окремі системи, так і засоби, створені об'єднанням кількох систем.

З використанням даних, опублікованих у довіднику [1], сформовано табл. 1, в якій показано варіанти поєднання в одному засобі виявлення кількох систем. Треба зазначити, що для наведених у табл. 1 засобів виявлення БпЛА з вказанням типу, варіанта поєднання і країни виготовлення існують аналоги в інших країнах. Така інформація є в довіднику [1]. Зауважимо, що засоби виявлення БпЛА з однаковими варіантами поєднання систем можуть мати різні алгоритми функціонування (взаємодії цих систем).

Як показано в табл. 1 проєктанти засобів виявлення БпЛА в різних варіантах поєднують використання радіолокаційної системи (РЛС), оптико-електронної системи (ОЕС), тепловізійної системи (ТВС), акустичної системи (АС) та системи спектрального аналізу сигналів від БпЛА (САС). Кожна така система має як позитивні (корисні) властивості в застосуванні для виявлення БпЛА, так і певні недоліки. Поєднання цих систем у радіоелектронний комплекс забезпечує збереження корисних властивостей кожної системи і нейтралізацію її недоліків іншою системою.

Таблиця 1

**Відомі варіанти поєднання систем виявлення БпЛА
в одному радіоелектронному комплексі [1]**

Назва комплексу виявлення БпЛА	Країна	Наявність системи в складі засобу виявлення				
		Радіолокаційна система (РЛС)	Оптико-електронна система (ОЕС)	Тепловізійна система (ТВС)	Акустична система (АС)	Спектральний аналіз сигналів від БпЛА (САС)
1	2	3	4	5	6	7
<i>У радіоелектронних комплексах дві системи</i>						
Tarsier	США	-----	ОЕС	ТВС	-----	-----
Anti-Thread Intelligent Detector	Ізраїль	-----	ОЕС	ТВС	-----	-----
Counter UAV System	Франція	РЛС	-----	ТВС	-----	-----
ІНТАР	Туреччина	РЛС	-----	-----	-----	САС
Hawk	Польща	РЛС	ОЕС	-----	-----	-----
Multi-sensor Anti-UAV Defense System	Китай	-----	ОЕС	-----	-----	САС
Drone Finder	Японія	-----	ОЕС	-----	АС	-----
<i>У радіоелектронних комплексах три системи</i>						
ICARUS	США	-----	ОЕС	-----	АС	САС
LDEW-CD	США	РЛС	ОЕС	ТВС	-----	-----
Drone safeguards	США	РЛС	-----	-----	АС	САС
Drone Guard System	Індія	-----	ОЕС	ТВС	-----	САС
Telescope	Великобританія	-----	-----	ТВС	АС	САС
Xpeller	ФРН	РЛС	ОЕС	-----	-----	САС
Detection Solution	Ізраїль	-----	ОЕС	ТВС	АС	-----

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
SAFESKY	Польща	РЛС	ОЕС	-----	АС	-----
<i>У радіоелектронних комплексах чотири системи</i>						
Drone Guardian	США	РЛС	ОЕС	ТВС	-----	САС
AD26B Anti-drone Guard	Бельгія	РЛС	ОЕС	ТВС	-----	САС
espCUAS	ФРН	РЛС	ОЕС	-----	АС	САС
Atos	Франція	РЛС	-----	ТВС	АС	САС
<i>У радіоелектронних комплексах п'ять систем</i>						
Windshear	США	РЛС	ОЕС	ТВС	АС	САС
Ctrl+Sky Mobile	Польща	РЛС	ОЕС	ТВС	АС	САС

Об'єднання кількох систем в одному засобі виявлення в статті називаємо радіоелектронним комплексом (РЕК) виявлення БпЛА. Можна очікувати, що таке об'єднання має підвищувати ефективність засобу. Однак в довіднику [1] не вказано значення показників ефективності засобів виявлення як для окремих систем, так і для створених радіоелектронних комплексів. Наявність значень показників ефективності кожного засобу виявлення БпЛА забезпечить об'єктивний (правильний) його вибір для практичного використання.

Як показник ефективності прийнято використовувати "ймовірність виявлення БпЛА". Відомі два підходи до отримання значень показника ефективності засобу виявлення БпЛА. Один підхід передбачає передавання засобу в експлуатацію та фіксацію даних про результативність виявлення БпЛА. На основі цих даних обчислюють значення показника "ймовірність виявлення БпЛА". Другий підхід до визначення показника ефективності передбачає розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК виявлення БпЛА. Розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК відповідного (необхідного) ступеня адекватності буде внеском в удосконалення інформаційної технології проектування засобів виявлення БпЛА.

Отже об'єктом розгляду в статті є експлуатаційна функційна поведінка РЕК виявлення БпЛА, до складу якого передбачено ввести чотири системи – РЛС, ОЕС, ТВС, АС. Радіоелектронний комплекс згідно із алгоритмом функціонування виявляє цілі в трьох зонах: в дальній зоні працює РЛС, в середній ОЕС або ТВС та в ближній – АС. Радіоелектронний комплекс функціонує з використанням денного і нічного режимів роботи. В денному режимі роботи РЕК виявлення БпЛА в середній зоні забезпечує ОЕС. У нічному режимі роботи РЕК виявлення БпЛА в середній зоні забезпечує ТВС.

У статті висвітлено вирішення завдання розроблення дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу із заданим алгоритмом функціонування, яка дає змогу проєктанту визначати значення показника його ефективності з використанням вказаних вище систем різних типів.

2. Відомі результати досліджень систем та радіоелектронних комплексів виявлення безпілотних літальних апаратів

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

Удосконалення радіолокаційних систем розглянуто в публікаціях [2–4].

Автори статті [2] зазначають, що основною проблемою під час радіолокаційного виявлення 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 доцільне застосування таких РЛС для виявлення БпЛА на дальностях прямої видимості 10–20 км. Однак треба урахувати, що РЛС не забезпечує ідентифікацію типу БпЛА і відповідно розпізнавання “свій – чужий”, а також не забезпечує прохованості своєї роботи.

У статті [3] автори вказують на те, опубліковано чимало робіт, в яких розглянуто методи та системи, реалізовані відповідно до різних фізичних принципів, призначені 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 недостатньо ефективні, оскільки операція виконується, як правило, за наявності завад, які мають певну структурну схожість із сигналом від БпЛА. Основну увагу звернено на методи інтерпретації отриманих даних з використанням навчених нейронних мереж.

В публікації [4] надані рекомендації стосовно того, на що треба звертати увагу під час оцінювання якості РЛС для виявлення БпЛА та системи аналізу сигналів від БпЛА.

Удосконалення оптико-електронних систем та тепловізійних систем розглянуто в [3, 5, 6].

У статті [5] 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 виникають на практиці. Проаналізовано точність позиціонування з використанням кореляційного алгоритму супроводу БпЛА на основі фільтра Калмана, за допомогою статистичного моделювання в середовищі програмування Matlab.

Автор статті [6] стверджує, що розроблення систем виявлення та ідентифікації БпЛА на основі аналізу його оптичного та теплового полів залишається актуальним. Здійснено огляд наявних оптико-електронних та тепловізійних систем такого типу.

Удосконалення акустичних систем виявлення БпЛА розглядануто в публікаціях [3, 7, 8, 9, 10].

Автори статті [7] вдосконалили спосіб виявлення БпЛА за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. Показано, що акустичний сигнал, створюваний БпЛА, можна подати сумою гармонічних складових. Критерієм надійного виявлення БпЛА є існування у прийнятому акустичному сигналі як мінімум трьох характерних гармонік.

Автори статей [8, 9, 10] розглядають використання акустичної сигнатури для виявлення та ідентифікації безпілотних літальних апаратів, які літають низько.

2.2. Публікації з обґрунтуваннями доцільності (з рекомендаціями) поєднання різних типів систем виявлення БпЛА в один радіоелектронний комплекс [6, 11, 12, 13]

Автор статті [6] дійшов висновку, що доцільним варіантом вирішення проблеми протидії БпЛА є розроблення багатофункціонального інтегрованого комплексу виявлення та ідентифікації БпЛА на основі поєднання радіолокаційного засобу виявлення малорухомих цілей, які низько літають (тобто з низькою доплерівською сигнатурою) та оптико-електронної системи. Запропоновано структуру багатофункціонального інтегрованого комплексу виявлення та ідентифікації БпЛА.

У статті [11] автори вказують, що низька ефективність використання РЛС і АС щодо виявлення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) пов'язана з їх низькою помітністю як в електромагнітному, так і в акустичному діапазонах довжин хвиль. Перспективним напрямом підвищення ефективності 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, можливе сумісне оброблення цих сигналів. Метою досліджень є розроблення методу виявлення БпЛА на основі аналізу їх сигнатур в акустичному та радіолокаційному діапазонах.

У статті [12] автори обґрунтовують доцільність введення тепловізійної системи до складу РЕК, в якому вже є ОЕС і АС. Подано результати дослідження залежності ефективності РЕК від відстані до цілі. Разом з цим автори статті зазначають, що поєднання трьох систем забезпечує (має) вищу надійність, ніж РЕК із двома системами. Для РЕК це означає зменшення кількості хибних повідомлень про виявлення і кількості невиявлених БпЛА.

Автори статті [13] пропонують алгоритм роботи РЕК, до складу якого входять РЛС, АС і ОЕС.

2.3. Підходи до оцінювання ефективності систем в публікаціях [14, 15]

У статті [14] автори висвітлюють 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 та необхідний аналіз даних для точного кількісного визначення можливостей технологій протидії БпЛА. Випробування, виконані згідно з цим підходом, дають змогу визначити кількісні обмеження, переваги і недоліки з погляду 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 подано варіант технології протидії БпЛА, який був оцінений за допомогою запропонованої методології.

Автори статті [15] наводять методики вирішення завдань 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 залежатиме від її здатності знаходити ціль у таких фізичних умовах контрольованої зони, особливостях польоту БпЛА через контрольовану зону та способу використання системи спостереження у разі виявлення цілі. Тоді в кожному конкретному випадку ймовірність виявлення цілі можна правильно оцінити 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 зараховують: дальність виявлення цілі R із заданими значеннями ймовірностей правильного виявлення D та хибної тривоги F , розмірів площі огляду S . Автори ввели узагальнений показник ефективності E , який “показує”, що найефективнішою буде та система спостереження, яка за заданих значень ймовірностей правильного виявлення D та хибної тривоги F огляне найбільший об’єм простору V за мінімальний час.

Незважаючи на широке використання РЕК виявлення БпЛА з системами в різних конфігураціях [1], публікацій із 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. Застосування інформаційної технології стохастичного моделювання показано: в статті [16] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки прицільного РЕК у складі РЛС, ОЕС, лазерний віддалемір, тепловізійна система та ІКС; в статті [17] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК виявлення наземних об’єктів противника, які уражають артилерійськими засобами; в статті [18] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки комплексу охоронної сигналізації, в якій враховано (подано): всі варіанти фіксацій 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 збігів повідомлень із контрольованих зон; у статті [19] для розроблення стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки, призначеної для розв'язання задач параметричного синтезу охоронної системи у складі комплексу охоронної сигналізації на сейсмічних датчиках та безпілотного авіаційного комплексу.

3. 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.

3.1. Алгоритм функціонування радіоелектронного комплексу

Використаний варіант алгоритму функціонування радіоелектронного комплексу є таким.

Початок: на позицію виведено БпЛА разом із пультом дистанційного пілотування. Увімкнено (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 прийнято умову, 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. Відтак інформаційно-керуюча система 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, відбувається 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 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 відома (визначена на кроці 2). Відповідно знаємо доцільну тривалість роботи ОЕС у середній контрольованій зоні.

Якщо ОЕС виявляє БпЛА, то передає повідомлення до ІКС. Інформаційно-керуюча система, своєю чергою, 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, у програмній стохастичній моделі подано показником ефективності ОЕС “ймовірність виконання завдання з використанням ОЕС”.

Якщо заданий час роботи ОЕС вичерпано (закінчився), а БпЛА не виявлено, здійснюється перехід на крок 4. Частина безпілотних літальних апаратів, для яких переліт через середню контрольовану зону так завершився, у програмній стохастичній моделі представлена показником ефективності ОЕС “ймовірність невиконання завдання з використанням ОЕС”.

Крок 4. Інформаційно-керуюча система вмикає (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 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, у 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 відображено показником “ймовірність невиконання завдання з використанням АС”.

Переваги цього алгоритму функціонування РЕК виявлення БпЛА такі:

- а) радіолокаційна система забезпечує виявлення БпЛА далеко від зони дії засобу ураження;
- б) наявність РЛС у складі радіоелектронного комплексу з розглянутим алгоритмом функціонування забезпечує певний рівень прихованості її роботи, оскільки тривалості її ввімкнення невеликі. Тривалість увімкнень РЛС відповідає часу перетину БпЛА дальньої контрольованої зони.

3.2. 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 РЕК готового до роботи БпЛА дорівнює 1
3. У стохастичній моделі тривалості роботи РЛС за командою інформаційно-керуючої системи, тобто від початку (від розрахункового моменту появи БпЛА в дальній контрольованій зоні) до моменту його виявлення, представлені експоненціальним 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 кінцевій.
4. У стохастичній моделі тривалості роботи ОЕС за командою інформаційно-керуючої системи, тобто від початку (від розрахункового моменту появи БпЛА в середній контрольованій зоні) до моменту виявлення БпЛА, також подані експоненціальним законом розподілу. В наступній версії стохастичної моделі треба урахувати, що зі зменшенням відстані між БпЛА і РЕК у середній контрольованій зоні умови виявлення БпЛА оптико-електронною системою покращуються. Тому для тривалостей роботи ОЕС в наступній версії стохастичної моделі необхідно використовувати закон розподілу Ерланга, порядок якого вищий за 3 (це число треба уточнити під час дослідження).
5. У стохастичній моделі тривалості роботи АС за 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 взяти до уваги, що зі зменшенням відстані між БпЛА і РЕК у ближній контрольованій зоні умови його виявлення акустичною системою покращуються. Тому для тривалостей роботи АС в наступній версії стохастичної моделі потрібно використовувати закон розподілу Ерланга порядку понад 10 (це число треба уточнити під час дослідження).
6. У стохастичній моделі вважається, що під час кожного прольоту БпЛА перетинає дальню, середню та ближню контрольовані зони саме в такій послідовності.

3.3. 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, наведено в табл. 2. Як базові для стохастичної моделі використовуємо події, що представляють закінчення процедур алгоритму функціонування РЕК [20, с. 65–71].

Таблиця 2

**Події експлуатаційної функційної поведінки РЕК
для її стохастичної моделі**

Подія-початок	Подія-закінчення	Середнє значення тривалостей ...
Система РЕК виявила БпЛА і передала про це цілевказівку (ЦВ) в ІКС	Цілевказівка, передана системою РЕК, прийнята в ІКС – БПО	-----
За командою від ІКС розпочала роботу РЛС у дальній контрольованій зоні	РЛС виявила БпЛА або закінчився час роботи РЛС із 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 із 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 із виявлення БпЛА в ближній контрольованій зоні – БП3	$T_{АС} \rightarrow T_A$

Згідно із табл. 2 базовими подіями експлуатаційної функційної поведінки РЕК є:

БПО – для моделі приймаємо, що альтернатив немає. Тобто система РЕК завжди виявляє БпЛА і дає повідомлення (цілевказівку) на РЛС.

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 цього: БпЛА має постановник завад, або є певні особливості місцевості й БпЛА здійснює політ на малій висоті.

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

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

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

Компонента вектора станів V_1 – “показує” стан РЛС. Значення компоненти: $V_1 = 0$ – радіолокаційна система очікує команду від ІКС “розпочати роботу” і цілевказівку (ЦВ); $V_1 = 1$ – радіолокаційна система за цілевказівкою виявила БпЛА до закінчення встановленого інформаційно-керуючою системою часу роботи РЛС і передала повідомлення на засіб ураження; $V_1 = 2$ – час роботи РЛС, встановлений інформаційно-керуючою системою, закінчився, а радіолокаційна система за ЦВ не виявила БпЛА. Початкове значення $V_1 = 0$.

Компонента вектора станів V_2 – “показує” стан ОЕС. Значення компоненти: $V_2 = 0$ – оптико-електронна система очікує команду від ІКС “розпочати роботу” і ЦВ; $V_2 = 1$ – оптико-електронна система за ЦВ виявила БпЛА до закінчення встановленого інформаційно-керуючою системою часу роботи ОЕС і передала повідомлення на засіб ураження; $V_2 = 2$ – час роботи ОЕС, встановлений інформаційно-керуючою системою, закінчився, а ОЕС за ЦВ не виявила БпЛА. Початкове значення $V_2 = 0$.

Компонента вектора станів $V3$ – “показує” стан АС. Значення компоненти: $V3 = 0$ – акустична система очікує команду від ІКС “розпочати роботу” і ЦВ; $V3 = 1$ – акустична система за 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 за ЦВ не виявила БПЛА. Початкове значення $V3 = 0$.

Допоміжна компонента вектора станів $V4$ – “показує” відповідність фінальних станів показником 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.

3.5. Показники ефективності систем, які входять до складу радіоелектронного комплексу і 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 із використанням ОЕС;

5) $(1 - P_{OE})$ – ймовірність невиконання завдання із 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.

3.6. Розроблення опорного графа станів і переходів

Згідно із технологією моделювання вербальну модель експлуатаційної функційної поведінки РЕК необхідно подати у вигляді опорного графа станів і переходів. Для розроблення опорного графа станів і переходів моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу використано методику, викладену в статті [21]. В табл. 3 висвітлено розроблення опорного графа станів і переходів.

Розроблений і наведений у табл. 3 граф станів і переходів відповідно до даних вербальної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу має 15 станів і 14 переходів між станами. Вхідні дані вербальної моделі подано в пунктах 3.1–3.5.

Таблиця 3

Розроблення опорного графа станів і переходів

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури (процесу)	Вектори станів				№ стану графа	Переходи з стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходів
			V1	V2	V3	V4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Початковий стан	-----	0	0	0	0	1	-----	-----
2	стан 1: БП1	P_{RL}	1	0	0	0	2р.у	1 → 2р.у	$P_{RL} \frac{1}{T_{RL}}$
		$1 - P_{RL}$	2	0	0	0	3р.н	1 → 3р.н	$(1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}}$
<p><i>Коментар до кроку 2:</i> розглядаємо вектор стану 1. В цьому стані графа відбувається базова подія БП1. У разі успішного завершення роботи РЛС у компоненти V1 змінюється значення з 0 на 1, у разі неуспішного у компоненти V1 змінюється значення з 0 на 2.</p> <p>ЗАЗНАЧИМО, що тут і надалі формула розрахунку інтенсивності переходів між станами графа komponується 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 означає, що РЛС виконала свою функцію успішно; 3р.н – стан 3 графа показує, що РЛС не виконала свою функцію</p>									
3	стан 2р.у: БП2	P_{OE}	1	1	0	0	4о.у	2р.у → 4о.у	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$
		$1 - P_{OE}$	1	2	0	0	5о.н	2р.у → 5о.н	$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$
<p><i>Коментар до кроку 3:</i> розглядаємо вектор стану 2р.у. В цьому стані графа відбувається базова подія БП2. У разі успішного завершення роботи ОЕС у компоненти V2 змінюється значення з 0 на 1, за неуспішного значення компоненти V1 змінюється з 0 на 2.</p> <p><i>Читати:</i> 4о.у – стан 4 графа свідчить, що ОЕС виконала свою функцію успішно 5о.н – стан 5 графа показує, що ОЕС не виконала свою функцію</p>									
4	стан 3р.н: БП2	P_{OE}	2	1	0	0	6о.у	3р.н → 6о.у	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$
		$1 - P_{OE}$	2	2	0	0	7о.н	3р.н → 7о.н	$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$
<p><i>Коментар до кроку 4:</i> розглядаємо вектор стану 3р.н. В цьому стані графа відбувається базова подія БП2. При успішному завершенні роботи ОЕС у компоненти V2 змінюється значення з 0 на 1. При не успішному завершенні роботи ОЕС у компоненти V2 змінюється значення з 0 на 2.</p>									
5	стан 4о.у: БП3	P_A	1	1	1	1	8а.у	4о.у → 8а.у	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	1	1	2	5	9а.н	4о.у → 9а.н	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$
<p><i>Коментар до кроку 5:</i> розглядаємо вектор стану 4о.у. В цьому стані графа відбувається базова подія БП3. У разі успішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 1. Оскільки на цьому робота РЕК з черговим БПЛА завершена, то стан 8а.у є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 1. За неуспішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 2. Відповідно стан 9а.н також є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 5.</p> <p><i>Читати:</i> 8а.у – стан 8 графа означає, що АС виконала свою функцію успішно 9а.н – стан 9 графа показує, що АС не виконала свою функцію</p>									

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	стан 5о.н: БПЗ	P_A	1	2	1	2	10а.у	5о.н → 10а.у	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	1	2	2	6	11а.н	5о.н → 11а.н	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$
<p><i>Коментар до кроку 6:</i> розглядаємо вектор стану 5о.н. У цьому стані графа відбувається базова подія БПЗ. Якщо успішно завершено роботу АС, значення компоненти V3 змінюється з 0 на 1. Оскільки на цьому роботі РЕК з черговим БпЛА завершена, то стан 10а.у є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 2. За неуспішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 2. Відповідно стан 11а.н також є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 отримує значення 6</p>									
7	стан 6о.у: БПЗ	P_A	2	1	1	3	12а.у	6о.у → 12а.у	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	2	1	2	7	13а.н	6о.у → 13а.н	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$
<p><i>Коментар до кроку 7:</i> розглядаємо вектор стану 6о.у. В цьому стані графа відбувається базова подія БПЗ. У разі успішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 1. На цьому роботі РЕК з черговим БпЛА завершена, тому стан 12а.у є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 3. За неуспішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 2. Відповідно стан 13а.н також є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 7</p>									
8	стан 7о.н: БПЗ	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	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$
<p><i>Коментар до кроку 8:</i> розглядаємо вектор стану 7о.н. В цьому стані графа відбувається базова подія БПЗ. У разі успішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 1. Оскільки на цьому роботі РЕК з черговим БпЛА завершена, то стан 14а.у є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 4. За неуспішного завершення роботи АС значення компоненти V3 змінюється з 0 на 2. Відповідно стан 15а.н також є фінальним (поглинальним) станом графа станів і переходів. З урахуванням значень компонент вектора станів V1, V2, V3 компонента V4 набуває значення 8</p>									

4. Показники ефективності радіоелектронного комплексу виявлення БпЛА та компонування формул для їх визначення

4.1. Показник ефективності РЕК “ймовірність виконання завдання”

Показник ефективності РЕК “ймовірність виконання завдання” (P_B) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), коли завдання виявлення БпЛА виконали три системи. Тобто цей показник треба визначати як умовну апіорну ймовірність виявлення БпЛА із застосуванням АС за умови, що БпЛА виявлено з використанням РЛС та ОЕС. Значення ймовірності виконання завдання РЕК “показує” у графі станів і переходів стан 8, тобто ймовірність перебування в стані 8:

$$P_B = P(A | R, O) = P_8(t_e), \quad (1)$$

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 восьмий стан графа за тривалості “спостереження” t_e .

4.2. Показник ефективності РЕК “ймовірність часткового виконання завдання”

Показник ефективності РЕК “ймовірність часткового виконання завдання” ($P_{ч.в}$) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), коли завдання виявлення БПЛА виконали дві або одна із трьох систем. Показник “ймовірність часткового виконання завдання” за розробленою стохастичною моделлю подаємо в трьох варіантах визначення. В першому варіанті – виконання завдання забезпечують дві системи РЕК із трьох $P_{1ч.в}$. В другому варіанті – виконання завдання забезпечує одна система РЕК з трьох $P_{2ч.в}$. Третій варіант показника подаємо як суму ймовірностей $P_{ч.в} = P_{1ч.в} + P_{2ч.в}$, тобто виконання завдання вважаємо частковим, якщо БПЛА виявлено двома або одною системою РЕК.

Значення для ймовірностей часткового виконання завдання РЕК “відображають” у графі станів ймовірності перебування у станах з 9 до 14. Тому значення ймовірностей часткового виконання завдання РЕК визначають як суму таких складових:

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

$$P_{ч.в1} = P(A | R, \bar{O}) = P_{10}(t_e), \quad (2)$$

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 десятий стан графа за тривалості “спостереження” t_e ;

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

$$P_{ч.в2} = P(A | \bar{R}, O) = P_{12}(t_e), \quad (3)$$

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 дванадцятий стан графа за 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:

$$P_{ч.в3} = P(A | \bar{R}, \bar{O}) = P_{14}(t_e), \quad (4)$$

де $P_{14}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у чотирнадцятий стан графа за тривалості “спостереження” t_e ;

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

$$P_{ч.в4} = P(\bar{A} | R, O) = P_9(t_e), \quad (5)$$

де \bar{A} – подія “невиявлення БпЛА з використанням АС”; $P_9(t_e)$ – ймовірність потрапляння у дев’ятий стан графа за тривалості “спостереження” t_e ;

д) умовна апіорна ймовірність невиявлення БпЛА з використанням АС за умови, що БпЛА виявлено з використанням РЛС, але не виявлено з використанням ОЕС:

$$P_{4.65} = P(\bar{A} | R, \bar{O}) = P_{11}(t_e), \quad (6)$$

де $P_{11}(t_e)$ – ймовірність потрапляння в одинадцятий стан графа затривалості “спостереження” t_e ;

е) умовна апіорна ймовірність невиявлення БпЛА з використанням АС за умови, що БпЛА не виявлено з використанням РЛС, але виявлено з використанням ОЕС:

$$P_{4.65} = P(\bar{A} | \bar{R}, O) = P_{13}(t_e), \quad (7)$$

де $P_{13}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у тринадцятий стан графа за тривалості “спостереження” t_e .

Формулу для отримання значення показника “ймовірність часткового виконання завдання” РЕК за розробленою стохастичною моделлю подаємо для трьох варіантів визначення. В першому варіанті виконання завдання забезпечують дві системи з трьох $P_{14.6}$. Формула для розрахунку значення ймовірності часткового виконання завдання РЕК $P_{14.6}$ за розробленою стохастичною моделлю у першому варіанті визначення має такий вигляд:

$$P_{14.6} = P_{10}(t_e) + P_{12}(t_e) + P_9(t_e). \quad (8)$$

Формула для розрахунку значення показника “ймовірність часткового виконання завдання” РЕК $P_{24.6}$ за розробленою стохастичною моделлю у другому варіанті визначення має такий вигляд:

$$P_{24.6} = P_{14}(t_e) + P_{11}(t_e) + P_{13}(t_e). \quad (9)$$

Формула для обчислення значення показника “ймовірність часткового виконання завдання” РЕК $P_{4.6}$ за розробленою стохастичною моделлю у третьому варіанті визначення має такий вигляд:

$$P_{4.6} = P_{10}(t_e) + P_{12}(t_e) + P_{14}(t_e) + P_9(t_e) + P_{11}(t_e) + P_{13}(t_e). \quad (10)$$

4.3. Показник ефективності РЕК “ймовірність не виконання завдання”

Показник ефективності РЕК “ймовірність невиконання завдання” ($P_{н.в}$) характеризує (показує) відсоток ситуацій (випадків, прольотів), у яких 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 із застосуванням ОЕС. Значення ймовірності невиконання завдання РЕК “показує” в графі станів ймовірність потрапляння у стан 15:

$$P_{н.в} = P(\bar{A} | \bar{R}, \bar{O}) = P_{15}(t_e), \quad (11)$$

де $P_{15}(t_e)$ – ймовірність потрапляння у 15-й стан графа за тривалості “спостереження” t_e .

5. Розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БпЛА

Для розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу використано методику, подану в статті [21].

5.1. Визначення компонент структурно-автоматної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК

У табл. 4–10 подано фрагменти опорного графа станів, з використанням яких визначають дві компоненти структурно-автоматної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК. А саме формалізовані описи ситуацій, в яких відбуваються базові події експлуатаційної функційної поведінки, та правила модифікації компонент вектора станів. Формалізовані описи ситуацій та правила модифікації компонент вектора станів забезпечують у програмній стохастичній моделі автоматизовану побудову графів станів і переходів для різних варіантів значень показників ефективності складових РЕК.

Таблиця 4

Фрагмент опорного графа станів, який відображає першу ситуацію для БП1

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи зі стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 1 для базової події БП1									
1	–	–	0	0	0	0	1	–	–
2	стан 1: БП1	P_{RL}	1	0	0	0	2р.у	1 → 2р.у	$P_{RL} \frac{1}{T_{RL}}$
		$1 - P_{RL}$	2	0	0	0	3р.н	1 → 3р.н	$(1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}}$

У табл. 4 використано такі позначення: 2р.у – стан 2, який відповідає успішним виконанням завдання РЛС (БпЛА виявлено); 3р.н – стан 3, який відповідає неуспішним виконанням завдання РЛС (БпЛА не виявлено).

Ситуація 1 для БП1: формалізований опис ситуації 1 (складено на основі вектора стану 1):
 $(V1=0) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4=0)$.

Для першої альтернативи – ФРІП: $P_{RL} \frac{1}{T_{RL}}$; правило МКВС: $V1:=1$.

Для другої альтернативи – ФРІП: $(1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}}$; правило МКВС: $V1:=2$.

ФРІП – формула розрахунку інтенсивності переходів між станами графа.

МКВС – модифікація компонент вектора станів графа.

Таблиця 5

Фрагмент опорного графа станів, який відображає першу ситуацію для БП2

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи з стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 1 для базової події БП2									
2	–	–	1	0	0	0	2р.у	–	–
3	стан 2р.у: БП2	P_{OE}	1	1	0	0	4о.у	2р.у → 4о.у	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$
		$1 - P_{OE}$	1	2	0	0	5о.н	2р.у → 5о.н	$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$

У табл. 5 використано такі позначення: 4о.у – стан 4, який відповідає успішним виконанням завдання ОЕС (БпЛА виявлено); 5о.н – стан 5, який відповідає неуспішним виконанням завдання ОЕС (БпЛА не виявлено).

Ситуація 1 для БП2: формалізований опис ситуації 1 (складено на основі вектора стану 2):
(V1=1) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0).

Для першої альтернативи – ФРП: $P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$; МКВС: V2:=1.

Для другої альтернативи – ФРП: $(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$; МКВС: V2:=2.

Таблиця 6

Фрагмент опорного графа станів, який відображає другу ситуацію для БП2

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи зі стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 2 для базової події БП2									
2	–	–	2	0	0	0	Зр.н	–	–
4	стан Зр.н: БП2	P_{OE}	2	1	0	0	6о.у	Зр.н → 6о.у	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$
		$1 - P_{OE}$	2	2	0	0	7о.н	Зр.н → 7о.н	$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$

Ситуація 2 для БП2: формалізований опис ситуації 2 (складено на основі вектора стану 3):
(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0).

Для першої альтернативи – ФРП: $P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$; МКВС: V2:=1.

Для другої альтернативи – ФРП: $(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$; МКВС: V2:=2.

Таблиця 7

Фрагмент опорного графа станів, який показує першу ситуацію для БП3

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи зі стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 1 для базової події БП3									
3	–	–	1	1	0	0	4о.у	–	–
5	стан 4о.у: БП3	P_A	1	1	1	1	8а.у.ф	4о.у → 8а.у.ф	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	1	1	2	5	9а.н.ф	4о.у → 9а.н.ф	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$

ф – позначення фінального (поглинального) стану графа станів і переходів.

У табл. 7 використано такі позначення: 8а.у – стан 8, який відповідає успішним виконанням завдання АС (БпЛА виявлено); 9а.н – стан 9, який відповідає неуспішним виконанням завдання РЛС (БпЛА не виявлено).

Ситуація 1 для БПЗ: формалізований опис ситуації 1 (складено на основі вектора стану 4):
(V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=0).

Для першої альтернативи – ФРІП: $P_A \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=1; V4:=1.

Для другої альтернативи – ФРІП: $(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=2; V4:=5.

Таблиця 8

Фрагмент опорного графа станів, який показує другу ситуацію для БПЗ

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи зі стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 2 для базової події БПЗ									
3	–	–	1	2	0	0	5о.н	–	–
6	стан 5о.н: БПЗ	P_A	1	2	1	2	10а.у.ф	5о.н → 10а.у.ф	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	1	2	2	6	11а.н.ф	5о.н → 11а.н.ф	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$

ф – позначення фінального (поглинаючого) стану графа станів і переходів.

Ситуація 2 для БПЗ: формалізований опис ситуації 2 (складено на основі вектора стану 5):
(V1=1) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0).

Для першої альтернативи – ФРІП: $P_A \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=1; V4:=2.

Для другої альтернативи – ФРІП: $(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=2; V4:=6.

Таблиця 9

Фрагмент опорного графа станів, який показує третю ситуацію для БПЗ

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи зі стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 3 для базової події БПЗ									
3	–	–	2	1	0	0	6о.у	–	–
7	стан 6о.у: БПЗ	P_A	2	1	1	3	12а.у.ф	5о.н → 10а.у.ф	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	2	1	2	7	13а.н.ф	5о.н → 11а.н.ф	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$

ф – позначення фінального (поглинаючого) стану графа станів і переходів.

Ситуація 3 для БПЗ: формалізований опис ситуації 3 (складено на основі вектора стану 6):
(V1=2) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=0).

Для першої альтернативи – ФРП: $P_A \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=1; V4:=3.

Для другої альтернативи – ФРП: $(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=2; V4:=7.

Таблиця 10

Фрагмент опорного графа станів, який показує четверту ситуацію для БПЗ

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна для цього стану БП	Ймовірність альтернативного завершення процедури або процесу	Стани об'єкта дослідження				№ стану графа	Переходи зі стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
			V1	V2	V3	V4			
Ситуація 4 для базової події БПЗ									
3	–	–	2	2	0	0	7о.н	–	–
8	стан 7о.н: БПЗ	P_A	2	2	1	4	14а.у.ф	7о.н → 14а.у.ф	$P_A \frac{1}{T_A}$
		$1 - P_A$	2	2	2	8	15а.н.ф	7о.н → 15а.н.ф	$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$

ф – позначення фінального (поглинаючого) стану графа станів і переходів.

Ситуація 4 для БПЗ: формалізований опис ситуації 4 (складено на основі вектора стану 7):
(V1=2) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0).

Для першої альтернативи – ФРП: $P_A \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=1; V4:=4.

Для другої альтернативи – ФРП: $(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$; МКВС: V3:=2; V4:=8.

Визначені з використанням табл. 4–10 компоненти структурно-автоматної моделі зведено в табл. 11. Форму подання структурно-автоматної моделі узгоджено з інтерфейсом програмного засобу АСНА-2 [22].

Поєднання розробленої структурно-автоматної моделі експлуатаційної функційної поведінки із програмним модулем автоматизованої побудови графів станів і переходів, формування та розв'язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена утворює програмну стохастичну модель. Алгоритм побудови графів станів і переходів на основі структурно-автоматної моделі описано в монографії [20, с. 79–92].

5.2. Верифікація структурно-автоматної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу

Верифікація структурно-автоматної моделі (САМ) експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виконана згідно з алгоритмом, запропонованим у роботі [23, с. 85, 86].

В основу алгоритму верифікації САМ покладено принцип виявлення і усунення розбіжностей між тестувальним графом і графом, отриманим від програмної стохастичної моделі на основі САМ. Як тестувальний граф станів і переходів використано опорний граф станів і переходів, поданий у табл. 3.

Таблиця 11

**Структурно-автоматна модель експлуатаційної функційної поведінки РЕК
виявлення БпЛА**

Базові події експлуатаційної поведінки РЕК	Формалізований опис ситуацій, в яких відбуваються базові події експлуатаційної поведінки РЕК	Формули розрахунку інтенсивностей переходів у графі	Правила модифікації компонент вектора станів
БП1	1) (V1=0) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_{RL} \frac{1}{T_{RL}}$	V1:=1
		$(1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}}$	V1:=2
БП2	1) (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$	V2:=1
		$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$	V2:=2
	2) (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_{OE} \frac{1}{T_{OE}}$	V2:=1
		$(1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}}$	V2:=2
	1) (V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_A \frac{1}{T_A}$	V3:=1; V4:=1
		$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$	V3:=2; V4:=5
БП3	2) (V1=1) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_A \frac{1}{T_A}$	V3:=1; V4:=2
		$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$	V3:=2; V4:=6
	3) (V1=2) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_A \frac{1}{T_A}$	V3:=1; V4:=3
		$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$	V3:=2; V4:=7
	4) (V1=2) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0)	$P_A \frac{1}{T_A}$	V3:=1; V4:=4
		$(1 - P_A) \frac{1}{T_A}$	V3:=2; V4:=8

6. 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t_e)}{dt_e} = - \left[P_{RL} \frac{1}{T_{RL}} + (1 - P_{RL}) \frac{1}{T_{RL}} \right] P_1(t_e) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_5(t_e)}{dt_e} = (1 - P_{OE}) \frac{1}{T_{OE}} P_2(t_e) - \left[P_A \frac{1}{T_A} + (1 - P_A) \frac{1}{T_A} \right] P_5(t_e) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_{10}(t_e)}{dt_e} = P_A \frac{1}{T_A} P_5(t_e) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{dP_{15}(t_e)}{dt_e} = (1 - P_A) \frac{1}{T_A} P_7(t_e) \end{array} \right. \quad (12)$$

Результати розв'язання системи диференціальних рівнянь (12), а саме значення ймовірностей “попадання” у фінальні (поглинальні) стани графа, використовуються (призначені) для формул визначення показників ефективності РЕК виявлення БпЛА. Формули (1), (8), (9), (10), (11) для визначення показників ефективності РЕК скомпоновано в пункті 4.

7. Валідація програмної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БпЛА

Для валідації розробленої програмної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки РЕК можна використовувати такі підходи до завдань віртуальних експериментальних досліджень [24]:

1) виконуємо експериментальні дослідження вибраних залежностей, зміни яких можна передбачити. Такими залежностями є залежності показників ефективності РЕК від зміни значень показників ефективності його складових.

2) порівняння часткового результату, отриманого за допомогою розробленої моделі, з результатом, одержаним за допомогою відомої моделі.

3) оцінювання (дослідження) тенденції зміни значень показників ефективності РЕК після підвищення ступеня адекватності його стохастичної моделі.

У запланованих (запропонованих) валідаційних експериментах зі збільшенням значень показників ефективності складових РЕК очікуваною є тенденція зростання або зменшення значень показників ефективності, а саме ймовірності виконання завдання, ймовірностей часткового виконання завдання та ймовірності невиконання завдання.

Початкові значення показників ефективності складових РЕК для описаних нижче валідаційних експериментів подано в табл. 12, 14, 16. У цих таблицях позначення Tk і Re – це параметри для числового методу розв'язання системи диференціальних рівнянь у програмному засобі АСНА-2 [22].

Валідаційний експеримент 1. Перевіряємо, як впливає зміна значення показника ефективності радіолокаційної системи P_{RL} на значення показників ефективності РЕК.

Результати експерименту наведено в табл. 13. Значення показників ефективності складових РЕК, задані в стохастичній моделі для валідаційного експерименту 1, подано в табл. 12.

Таблиця 12

Значення показників ефективності складових РЕК для валідаційного експерименту 1

позначення	P_{OE}	P_A	T_{RL}	T_{OE}	T_A	Tk	Re
значення	0,8	0,8	360 с	36 с	6 с	4000 с	0,0000000001

Очікувані результати валідаційного експерименту 1:

- 1) зі збільшенням значень ймовірності P_{RL} має зростати $P_{в.заг}$ ($3c+2c+1c$);
- 2) значення ймовірності виконання завдання РЕК з трьох систем має перевищувати значення показника ефективності РЛС у разі автономного її використання для завдання виявлення БпЛА.

Таблиця 13

Залежності показників ефективності РЕК виявлення БпЛА від значень показника ефективності радіолокаційної системи P_{RL}

Показники ефективності РЕК	Значення показників ефективності РЕК за зміни значень показника ефективності радіолокаційної системи						
	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99
P_{RL}							
P_B (3c)	0,384	0,448	0,51199	0,544	0,576	0,608	0,6336
$P_{1ч.в}$ (2c)	0,448	0,416	0,384	0,368	0,352	0,336	0,3232
$P_{2ч.в}$ (1c)	0,152	0,124	0,096	0,082	0,068	0,054	0,0428
$P_{в.заг}$ (3c+2c+1c)	0,984	0,988	0,99199	0,994	0,996	0,998	0,9996
$P_{н.в}$	0,016	0,012	0,008	0,006	0,004	0,002	0,0004

Аналіз результатів валідаційного експерименту 1:

а) у разі збільшення значень ймовірності виконання завдання РЛС, спостерігаємо (бачимо) зростання значень ймовірності виконання завдання трьома системами і зменшення значень ймовірностей виконання завдання двома системами із трьох і однією системою із трьох;

б) сумарне значення ймовірностей виконання завдання РЕК трьома системами, двома системами із трьох і однією системою із трьох перевищує значення показника ефективності РЛС за автономного її використання для виконання завдання виявлення БпЛА.

Валідаційний експеримент 2. Перевіряємо, як впливає зміна значення показника ефективності оптико-електронної системи P_{OE} на значення показників ефективності РЕК.

Результати експерименту подано в табл. 15. Значення показників ефективності складових РЕК, задані в стохастичній моделі для валідаційного експерименту 2, наведено в табл. 14.

Таблиця 14

Значення показників ефективності складових РЕК для валідаційного експерименту 2

позначення	P_{RL}	P_A	T_{RL}	T_{OE}	T_A	T_k	Re
значення	0,8	0,8	360 с	36 с	6 с	4000 с	0,000000001

Очікувані результати валідаційного експерименту 2:

- 1) зі збільшенням значень ймовірності P_{OE} має зростати $P_{в.заг}$ ($3c+2c+1c$);
- 2) значення ймовірності виконання завдання РЕК із трьох систем має перевищувати значення показника ефективності ОЕС в разі автономного її використання для виявлення БпЛА.

Таблиця 15

Залежності показників ефективності РЕК виявлення БпЛА від значень показника ефективності оптико-електронної системи P_{OE}

Показники ефективності РЕК	Значення показників ефективності РЕК у разі зміни значень показника ефективності оптико-електронної системи P_{OE}						
	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99
P_{OE}							
P_B (3c)	0,3839	0,448	0,512	0,544	0,5758	0,6078	0,63359
$P_{1ч.в}$ (2c)	0,448	0,416	0,384	0,368	0,352	0,336	0,3232
$P_{2ч.в}$ (1c)	0,152	0,124	0,096	0,082	0,068	0,054	0,0428
$P_{в.заг}$ (3c+2c+1c)	0,9839	0,988	0,992	0,994	0,9958	0,9978	0,99959
$P_{н.в}$	0,016	0,012	0,008	0,006	0,004	0,002	0,0004

Аналіз результатів валідаційного експерименту 2:

а) зі збільшенням значень ймовірності виконання завдання ОЕС спостерігаємо (бачимо) зростання значень ймовірності виконання завдання трьома системами і зменшення значень ймовірностей виконання завдання двома системами із трьох і одною системою із трьох;

б) сумарне значення ймовірностей виконання завдання РЕК трьома системами, двома системами із трьох і однією системою із трьох перевищує значення показника ефективності ОЕС у разі автономного її використання для виконання завдання виявлення БпЛА.

Валідаційний експеримент 3. Перевіряємо, як впливає зміна значення показника ефективності акустичної системи P_A на значення показників ефективності РЕК.

Результати експерименту подано в табл. 17. Значення показників ефективності складових РЕК, задані в стохастичній моделі для валідаційного експерименту 3, наведено в табл. 16.

Таблиця 16

**Значення показників ефективності складових РЕК
для валідаційного експерименту 3**

позначення	P_{RL}	P_{OE}	T_{RL}	T_{OE}	T_A	T_k	Re
значення	0,8	0,8	360 с	36 с	6 с	4000 с	0,0000000001

Очікувані результати валідаційного експерименту 3:

- зі збільшенням значень ймовірності P_A має зростати $P_{B,3AG}(3c+2c+1c)$;
- значення ймовірності виконання завдання РЕК із трьох систем має перевищувати значення показника ефективності АС у разі автономного її використання для виявлення БпЛА.

Таблиця 17

**Залежності показників ефективності РЕК виявлення БпЛА
від значень показника ефективності акустичної системи P_A**

Показники ефективності РЕК	Значення показників ефективності РЕК у разі зміни значень показника ефективності акустичної системи P_A						
	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99
$P_B(3c)$	0,384	0,448	0,51199	0,544	0,576	0,608	0,6336
$P_{1ч.В}(2c)$	0,448	0,416	0,384	0,368	0,352	0,336	0,3232
$P_{2ч.В}(1c)$	0,152	0,124	0,096	0,082	0,068	0,054	0,0428
$P_{B,3AG}(3c+2c+1c)$	0,984	0,988	0,99199	0,994	0,996	0,998	0,9996
$P_{НВ}$	0,016	0,012	0,008	0,006	0,004	0,002	0,0004

Аналіз результатів валідаційного експерименту 3:

а) зі збільшенням значень ймовірності виконання завдання АС спостерігаємо (бачимо) зростання значень ймовірності виконання завдання трьома системами і зменшення значень ймовірностей виконання завдання двома системами із трьох і однією системою із трьох;

б) сумарне значення ймовірностей виконання завдання РЕК трьома системами, двома системами із трьох і однією системою із трьох перевищує значення показника ефективності АС за автономного її використання для виявлення БпЛА.

Висновки

1. Запропонована дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу в складі РЛС, ОЕС, ТВС, АС, системи РЕК та ІКС із

заданим алгоритмом його функціонування дає змогу розв'язувати задачу аналізу і задачу синтезу. Задача аналізу формулюється для визначення показника ефективності радіоелектронного комплексу з відомими значеннями показників ефективності конкретних систем, які заплановано ввести до його складу. Задача синтезу формулюється для обчислення значень показників ефективності конкретних систем, які забезпечать задане значення показника ефективності радіоелектронного комплексу.

2. Ступінь адекватності запропонованої дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу визначає урахування показників ефективності систем, що входять до його складу. Як показники ефективності систем використано “ймовірності виявлення БпЛА системою радіоелектронного комплексу, коли він перебуває у відповідній контрольованій зоні” та “середні значення інтервалів часу від моменту появи БпЛА в контрольованій зоні до моменту їх виявлення відповідною (кожною) системою”.

3. Виконані валідаційні експерименти на розробленій стохастичній моделі експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу показали відповідність змін значень показника його ефективності змінам значень показників ефективності систем, передбаченим в якісному представленні цих змін. Така відповідність підтверджує певний ступінь достовірності отриманих результатів.

4. Стохастична модель забезпечує розв'язання задач аналізу та синтезу РЕК виявлення БпЛА, коли в середній контрольованій зоні використовують ОЕС і ТВС в денному і нічному режимах роботи, як окремо (почергово), так і одночасно.

5. Продовження досліджень із тематики, започаткованої (висвітленої) в статті, передбачає вирішення таких завдань:

а) формування методик визначення показників ефективності систем, що заплановано ввесати до складу радіоелектронного комплексу через параметри систем з урахуванням особливостей місцевості, на якій має працювати радіоелектронний комплекс, та типів БпЛА;

б) розроблення стохастичних моделей: з іншими варіантами алгоритму функціонування радіоелектронного комплексу; з іншими умовами перетину БпЛА контрольованих зон; з іншими варіантами вибору типу систем, які входять до складу радіоелектронного комплексу.

Список використаних джерел

- [1] “Counter-drone systems”, 2nd Edition, Arthur Holland Michel, December 2019. Access mode: <https://www.calameo.com/read/000009779458ad0134023>, Date of access: 17.08.2023
- [2] 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, No. 2, pp. 92–98. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_2_21
- [3] 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
- [4] “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
- [5] 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 Serii A – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, (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.
- [6] V. M. Sineglazov, “Complex structure of UAVs detection and identification”, *Electronics and Control Systems, Kyiv, Aviation Computer-Integrated Complexes Department, National Aviation University*, 2015, No. 3(45), pp. 28-32. DOI:10.1109/ICICSP.2018.8549736. ISSN 1990-5548. Access mode: svm@nau.edu.ua
- [7] V. I. Chyhin, M. M. Protsenko, Y. V. Shabaturova, and M. V. Buhaiov, “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

- [8] 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
- [9] 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, No. 3, pp. 279-283. DOI: 10.14429/dsj.51.2238
- [10] 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
- [11] 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, No. 4, pp. 71–80. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2014_4_13.
- [12] 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=&number=9413241&isnumber=9411911>
- [13] 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
- [14] C. Kouhestani, B. Woo, and G. Birch, "Counter unmanned aerial system testing and evaluation methodology", *Proc. SPIE 10184, Sensors, and Command, Control, Communicatons, and Intelligtnce (C3I) Technologies for Homeland Security, Defence, and Law Enforcement Applications XVI*, 1018408 (5 May 2017). DOI: 10.1117/12.2262538.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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, Vol. II, Kherson, Ukraine, June 12–15, 2019*, pp. 761-776.
- [18] 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
- [19] 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>
- [20] B. Yu. Volochiy, "Technology of modeling algorithms of behavior of information systems", Lviv, Lviv Polytechnic National University Press, 2004, 220 p.
- [21] 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 Lviv Polytechnic National University "Computer Science and Information Technology"*, Lviv Polytechnic National University Press, 2017, No. 864, pp. 49-62.
- [22] B. Yu. Volochiy, L. D. Ozirkovsky, "System engineering design of telecommunication networks. A practical guide", Lviv, Lviv Polytechnic National University Press, 2012, 128 p.
- [23] B. Volochiy, V. Yakubenko, Y. Salnyk & P. Chernyshuk, "Software stochastic model of operational behavior of fault-tolerant systems of majoritarian type with voting rule {3 out of 5}", 2021, *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering*, Vol. 1, No. 2, 2021, pp. 94-113. DOI: 23939/ict2021.02.094

SOFTWARE ANALYTICAL STOCHASTIC MODEL OF OPERATIONAL FUNCTIONAL BEHAVIOR OF THE ELECTRONIC COMPLEX FOR DETECTING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Bohdan Volochiy¹, Volodymyr Onishchenko², Leonid Ozirkovskyy¹

¹ Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

² Hetman Petro Sahaidachny National Academy of Land Forces, 32, Heroiv Maidan str., Lviv, Ukraine

The article considers an electronic system for detecting unmanned aerial vehicles, which includes a radar system, an optoelectronic system, a thermal imaging system, and an acoustic system. In information technology, the development of a software discrete-continuous stochastic model of the operational behavior of an electronic complex is an important stage in the creation of a structural-automatic model. The creation of a structural-automatic model is described in the article in the following sequence: description of the selected algorithm for the functioning of the electronic complex; verbal model of the operational functional behavior of the electronic complex; according to the verbal model, the development of a reference graph of states and transitions is described; on the basis of the reference graph of states and transitions, a structural-automatic model of operational behavior is formed; the need to verify the developed structural-automatic model is indicated. The combination of the structural-automatic model of operational behavior with the ASNA-2 software module forms a software stochastic model. The software stochastic model is designed to solve the problems of system engineering design (analysis and synthesis) of an electronic complex. The structural-automatic model allows the Designer to set any values of the performance indicators of the systems that are included in the electronic complex. The ASNA-2 software module automates the construction of state graphs based on the structural automated model; according to the state graph, it generates and solves the Kolmogorov-Chopman system of differential equations. By validating the software stochastic model, the reliability of the results to be obtained by the Projector was verified.

Key words: *unmanned aerial vehicles, detection of air targets; UAV detection electronic complex; operational behavior of the complex; structural-automatic model of operational behavior; discrete-continuous stochastic model of operational behavior; validation of the stochastic model.*