

Ю. П. Сальник<sup>1</sup>, Б. Ю. Волочій<sup>2</sup><sup>1</sup> Національна академія сухопутних військ, Львів, Україна<sup>2</sup> Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

## СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ ОХОРОННОЇ СИСТЕМИ ОБ'ЄКТА КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Анотація. Актуальність.** Об'єкти критичної інфраструктури потребують надійної охорони. До охоронних систем таких об'єктів висувається ряд специфічних вимог. Виконання частини цих вимог може забезпечувати комплекс охоронної сигналізації, в якому використовуються сигналізаційні системи із сейсмічними датчиками. Другу частину вимог може виконати безпілотний авіаційний комплекс. Тому практична доцільність бачиться в поєднанні цих двох комплексів в одну охоронну систему з трьома зонами контролю. Першу (дальню) та другу (ближню) зони контролю обслуговує комплекс охоронної сигналізації. Третя зона контролю (зона супроводу порушника) призначається на основі даних від комплексу охоронної сигналізації про тип порушника, його швидкість та напрямок руху. Безпілотний авіаційний комплекс застосовують до виконання завдання охоронної системи в зоні супроводу порушника по команді від комплексу охоронної сигналізації. Для реалізації такої охоронної системи треба знати відповіді на два питання. Перше, яке значення показника ефективності охоронної системи забезпечить поєднання існуючих комплексів з їх показниками функціональності. І друге, якими мають бути вимоги до показників функціональності цих комплексів, щоб охоронна система забезпечувала необхідне значення показника ефективності. **Мета дослідження** – показати потенційне значення показника ефективності охоронної системи, сформованої з існуючих комплексів, а також оцінити можливість підвищення її ефективності. **Метод.** Досягнути поставленої мети дає змогу стохастична модель функціональної поведінки, яка має відтворювати всі варіанти реакції складових охоронної системи на перетин порушниками трьох зон контролю. **Результати.** Основним результатом є дискретно-неперервна стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи об'єкта критичної інфраструктури у вигляді системи 76 диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Ступінь адекватності стохастичної моделі дає змогу, крім задачі аналізу ефективності охоронної системи, вирішувати задачу синтезу показників функціональності складових комплексів, які поєднані в охоронну систему. **Висновки.** Проведені дослідження показали, що для об'єктів критичної інфраструктури створювати охоронну систему з існуючих комплексів охоронної сигналізації та безпілотних авіаційних комплексів недоцільно через те, що вона буде мати недопустимо низьку ефективність. На основі розв'язання задачі синтезу, надані значення показників функціональності складових кожного комплексу зокрема, які забезпечать необхідне значення показника ефективності охоронної системи. Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи може бути використана в інформаційній технології її проектування для пошуку компромісних рішень між різними варіантами складу, структури та функціональної поведінки охоронної системи.

**Ключові слова:** стохастична модель; ефективність системи; функціональна поведінка системи; сигналізаційна система з сейсмічним датчиком; комплекс охоронної сигналізації; безпілотний авіаційний комплекс; охоронна система.

### Абревіатура

БЗК – ближня зона контролю;  
БП – базова подія;  
БпАК – безпілотний авіаційний комплекс;  
БпЛА – безпілотний літальний апарат;  
ДЗК – дальня зона контролю;  
зона СП – зона супроводження порушника;  
КОС – комплекс охоронної сигналізації;  
ОКІ – об'єкт критичної інфраструктури;  
ОС – охоронна система;  
ПДП – пункт дистанційного пілотування;  
СПВІ – система приймання і відображення інформації;  
СССД – сигналізаційна система із сейсмічним датчиком;  
ФРІП – формула розрахунку інтенсивності переходу.

### Номенклатура

$P_{l.ex}$  – показник ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано»;  
 $P_{u.c}$  – показник ефективності «Ймовірність обману користувача ОС»;  
 $P_{l.ex.p}$  – показник ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково»;  
 $P_{l.n.ex}$  – показник ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано»;  
 $P_{det UGS}$  – ймовірність виявлення порушника сигналізаційною системою КОС;  
 $P_{det UAV}$  – ймовірність виявлення порушника;

$P_{id UGS}$  – ймовірність правильного розпізнавання типу порушника сигналізаційною системою комплексу охоронної сигналізації;  
 $P_{d UGS}$  – ймовірність успішного доставлення повідомлення про порушника на СПВІ;  
 $T_{det1} (T_{det2})$  – середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в ДЗК (в БЗК) до моменту завершення формування сигналу для процедури розпізнавання його типу;  
 $P_{id UAV}$  – ймовірність правильного розпізнавання типу порушника;  
 $P_{des UAV}$  – ймовірність правильної ідентифікації порушника;  
 $P_{d.c UAV}$  – ймовірність визначення координат порушника з необхідною точністю;  
 $P_{d UAV}$  – ймовірність успішного доставлення інформації про порушника від ПДП до служби охорони ОКІ;  
 $t_{id}$  – тривалість процедури розпізнавання типу порушника;  
 $T_{det3}$  – середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в зоні СП до моменту його виявлення;  
 $t_{des}$  – тривалість процедури ідентифікації порушника;  
 $t_{d.c}$  – тривалість процедури визначення координат порушника;  
 $t_d$  – тривалість процедури доставлення повідомлення про порушника до служби охорони.

## Вступ

В умовах сьогодення захист об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) від терористичних та кримінальних атак стає все більш актуальним. Провідні фахівці країн світу розглядають можливість відмови у найближчому майбутньому від традиційних технічних засобів охорони на користь роботизованих комплексів наземного та повітряного базування. Велике різноманіття таких комплексів, що були розроблені в останні десятиліття, дає змогу створювати охоронні системи для ОКІ з урахуванням особливостей та умов виконання ними завдань [1-3].

В статтях доведена необхідність та доцільність оснащення служби охорони ОКІ комплексами охоронної сигналізації (КОС) [4-6] та безпілотними авіаційними комплексами (БпАК) [7-9]. Однак, крім чисельних суттєвих переваг зазначених комплексів, існують певні обмеження щодо їх застосування. Наприклад, застосування тільки КОС оснащених сигналізаційними системами з сейсмічними датчиками обмежується недостатньою достовірністю відомих методів розпізнавання типу порушника. Ймовірність визначення типу порушника для таких методів не перевищує 0,85 [10]. Крім того, такі КОС не забезпечують отримання координат порушника в масштабі реального часу (крім тих випадків, коли створюється розгалужена мережа сигналізаційних систем). Застосування тільки БпАК вирішує зазначені проблеми. Однак, застосування БпАК ускладнено ненадійністю його складових, а саме безпілотних літальних апаратів (більше 50% загальних втрат), обмеженням ресурсом та необхідністю тривалого дешифрування знімків місцевості (особливо у разі коли об'єкт, що охороняється, значний за розмірами або рознесений на місцевості). Тому спільне застосування КОС та БпАК у єдиній охоронній системі (ОС) може дати синергетичний ефект підвищення її ефективності.

### 1. Формулювання проблеми та аналіз літератури

Поєднання у ОС існуючих БпАК та КОС ускладнене відсутністю їх комплексування на технічному та інформаційному рівнях, суттєвими відмінностями в принципах застосування та обслуговування, інших. Відомо, що зазначені проблеми притаманні для всіх складних систем та їх вирішення здійснюється на етапі системотехнічного проектування перспективної системи [11-13].

Для розв'язання задачі системотехнічного проектування ОС використаємо запропоновані в статті [14] чотири показники ефективності: ймовірність того, що завдання ОС виконано; ймовірність того, що завдання ОС виконано частково; ймовірність того, що завдання ОС не виконано; ймовірність «обману користувача» ОС. Визначення значень цих показників можливе двома шляхами: перший – проведення натурного експерименту, другий – проведення наукового експерименту з використанням стохастичної моделі [11].

Як вказано в монографії [12] ряд суттєвих переваг має другий шлях отримання показників ефек-

тивності. Оскільки стохастична модель представляє собою систему диференціальних рівнянь, то з їх допомогою можна для кожного варіанту умов і для заданих значень показників функціональності складових ОС обраховувати значення показників її ефективності.

Для реалізації наукового експерименту з використанням стохастичної моделі об'єкта дослідження для визначення показників ефективності ОС існує технологія її розроблення, яка забезпечує високий ступінь адекватності [14]. Зауважимо, що об'єктом дослідження є всі можливі варіанти реакції ОС на перетин порушниками зон контролю.

Тому **метою статті** є розроблення стохастичної моделі функціональної поведінки охоронної системи об'єкту критичної інфраструктури, яка для виконання поставлених завдань функціонально поєднує комплекс охоронної сигналізації та безпілотний авіаційний комплекс; модель повинна бути здатною відтворювати реакції складових охоронної системи на перетин порушниками трьох зон контролю.

### 2. Евристичний синтез структурно-функціональної схеми перспективної охоронної системи

Для проектування ОС розглянемо її як складну систему [12], тобто, як сукупність комплексів, що є складовими системи, яка призначена для виконання завдань з охорони ОКІ від терористичних та кримінальних атак. Більшості завдань з охорони ОКІ притаманні два етапи їх виконання. На першому етапі, здійснюється виявлення та розпізнавання порушника на дальніх підступах із визначенням напрямку його руху. На другому етапі, визначаються координати порушника для забезпечення подальших заходів із запобігання потрапляння порушника до ОКІ. Для виконання цих етапів типового завдання з охорони, технічні засоби охорони, які входять до складу ОС, повинні утворити три зони контролю (ЗК). Завданням сигналізаційних систем із сейсмічними датчиками (СССД), що входять в склад КОС, встановлених в дальній зоні контролю (ДЗК), є завчасне виявлення порушника, що перетинає ЗК, та визначення його типу. Сигналізаційні системи в ближній зоні контролю (БЗК) встановлюються на шляху імовірного висування порушника, на такій відстані від ДЗК, яка дозволяє з достатньою точністю визначити напрямок та швидкість його руху.

Напрямок руху, кількість та тип порушників визначені за повідомленнями, отриманими системою приймання і відображення інформації (СПВІ), від сигналізаційних систем встановлених в ДЗК і БЗК дають змогу розрахувати розміщення третьої зони контролю. В цій зоні буде здійснюватися супроводження порушника за допомогою БпАК. Третя зона контролю, яку будемо називати зоною супроводження порушника (зона СП), це район, в якому у певний час прогнозовано пересування порушника виявленого і розпізнаного в ДЗК та БЗК.

Ефективність ОС, в якій поєднані КОС та БпАК, залежить від значень показників функціональності їх складових. Наприклад, для сигналізаційних систем

КОС такими показниками є імовірність виявлення та правильного розпізнавання типу порушника, імовірність доставляння повідомлення про нього до СПВІ та середні значення інтервалів часу від появи порушника в зоні контролю до закінчення формування сигналу для процедури розпізнавання.

До складу КОС, структурна схема якого представлена в статті [15], входять: система прийняття та відображення інформації та дві сигналізаційні системи із сейсмічними датчиками, які розташовують в зонах контролю. До складу кожної СССД входять: сейсмічний датчик, пристрій розпізнавання типу порушника та радіопередавач. До складу БпАК, структурна схема

якого представлена в статті [16], входять БпЛА та пункт дистанційного пілотування (ПДП).

Об'єкт дослідження, тобто функціональну поведінку ОС у складі КОС та БпАК, представимо вербальною моделлю. У вербальній моделі показана послідовність виконання процедур складовими ОС.

### 3. Вербальна модель функціональної поведінки перспективної охоронної системи у складі КОС та БпАК

Розглянемо докладно процедури (рис. 1), які формують реакції ОС на перетин порушником зон контролю.

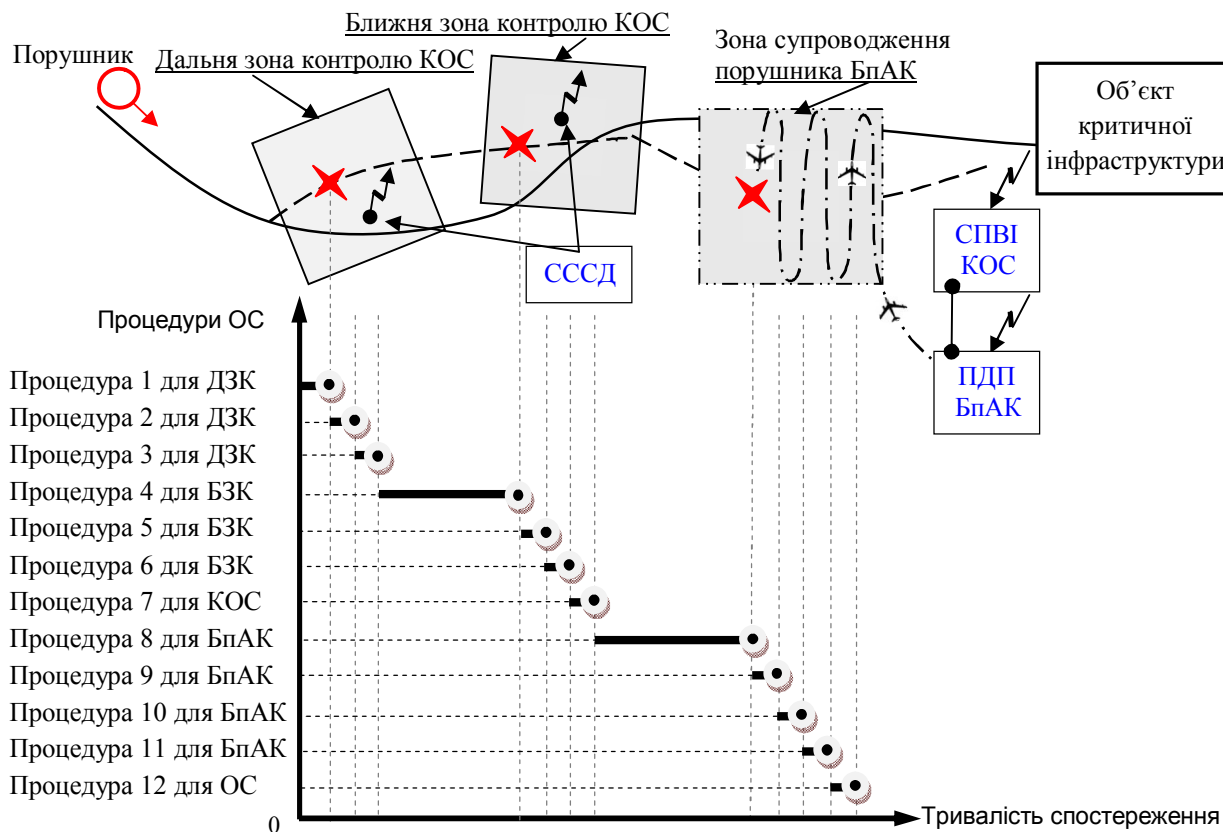


Рис. 1. Процес, що відповідає реакції ОС на перетин порушником трьох зон контролю (Fig. 1. The process that corresponds to reaction of the security system to intersection of the violator of the three control zones)

У верхній частині рис. 1 представлена схема послідовного перетину порушником зон контролю під час його руху в напрямку ОКІ. На імовірному напрямку руху порушника встановлені дві зони контролю і показано визначене розміщення зони СП. Підчас перетину порушником зон контролю послідовно виконуються описані нижче процедури, СПВІ приймає повідомлення сформовані в СССД, на ПДП приймається інформація від систем спостереження і передавання інформації БпЛА. У нижній частині рис. 1 показаний порядок виконання процедур згідно алгоритму функціонування запропонованої ОС, які відображають формування її реакції на перетин порушником зон контролю. З рис. 1 видно, що реакція охоронної системи на перетин порушниками зон контролю відповідає дискретно-неперервному випадковому процесу. Розглянемо особливості виконання процедур представлених на рис. 1.

**Процедури 1 та 4.** Виявлення порушників, що перетинають зону контролю, сигналізаційною системою КОС.

Порушник може бути виявлений або не виявлений СССД. При цьому СССД технічно справна і готова до роботи. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Імовірність виявлення порушника в зоні контролю». Його значення залежить від: відстані на якій порушник проходить від місця розташування СССД; використання порушником спеціального обладнання, що ускладнює його виявлення; типу ґрунту, в який встановлена СССД. Тривалість виконання процедури визначається з моменту появи порушника в зоні контролю та завершується передачею сигналу для процедури розпізнавання типу порушника. Складовими тривалості процедури є інтервал часу від моменту появи порушника в зоні контролю до момен-

ту його фіксації сейсмічним датчиком та тривалості перетворення сейсмічного сигналу в електричний.

**Процедура 2 та 5.** Розпізнавання типу порушників виявлених сигналізаційною системою КОС в зоні контролю.

В результаті виконання зазначеної процедури тип порушника може бути розпізнаний правильно або не правильно. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність правильного розпізнавання типу порушника». Його значення залежить від багатьох чинників, в першу чергу від обраного методу розпізнавання.

Результат визначення типу порушника передається у повідомленні від СССД до СПВІ за допомогою радіопередавача.

**Процедура 3 та 6.** Доставляння повідомлень з інформацією про тип порушників від СССД встановлених в зоні контролю до СПВІ.

Від передавача кожної СССД повідомлення про тип порушника може бути доставлено до СПВІ з певною ймовірністю. Досконалість процедури характеризується показником – «Ймовірність успішного доставлення повідомлення про порушника до СПВІ». Недоставляння повідомлення про порушника до СПВІ може бути спричинено умовами поширення радіохвиль, наявністю радіозавад природного або техногенного характеру.

**Процедура 7.** Приймання рішення СПВІ про тип порушників та визначення зон СП на основі повідомлень сформованих СССД в кожній зоні контролю та доставляння повідомлення з цією інформацією до ПДП.

Порядок виконання сьомої процедури реалізовано в методі прийняття рішень, описаного в статті [15].

**Процедура 8.** Виявлення порушників, що перетинають зону СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК. Ця процедура включає в себе збирання інформації про зону СП системою спостереження БпЛА, передавання її до ПДП для аналізу та виявлення порушника.

В результаті виконання цієї процедури на ПДП приймається рішення про наявність порушника в зоні СП за інформацією з БпЛА. Досконалість процедури характеризується показником функціональності розміщених на БпЛА систем спостереження та передавання інформації і розміщеної на ПДП системи виявлення порушника – «Ймовірність виявлення порушника БпАК». Його значення залежить від: розмірів зони СП; складу та можливостей систем спостереження БпЛА, а також методу оброблення прийнятої інформації в ПДП.

**Процедура 9.** Розпізнавання типу порушників, виявлених в зоні СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК.

В результаті виконання зазначеної процедури, по інформації отриманої від системи спостереження БпЛА, тип порушника може бути розпізнаний правильно або не правильно. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність розпізнавання типу порушника БпАК». Його значення залежить від можливостей обраного методу розпізнавання. Ці можливості, в

свою чергу, залежать від якості системи спостереження БпЛА, від використання порушником засобів, що ускладнюють його розпізнавання, від погодних умов та інших. На завершення цієї процедури на ПДП підтверджується або не підтверджується правильність розпізнавання типу порушника виявленого в зонах, які контролює КОС.

**Процедура 10.** Ідентифікація порушників, виявлених в зоні СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК.

В результаті виконання зазначеної процедури на ПДП отримується інформація про стан порушника, його приналежність (свій-чужий), інших характеристик та порушника відносять до певної категорії загрози ОКІ. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність правильної ідентифікації порушника». Його значення залежить від можливостей обраного методу ідентифікації. Ці можливості в свою чергу залежать, від якості сигналу системи спостереження БпЛА, від використання порушником засобів, що ускладнюють його ідентифікацію, від обмеження на час виконання процедури та інших факторів.

**Процедура 11.** Визначення поточних координат порушників, виявлених в зоні СП, на пункті дистанційного пілотування БпАК.

В результаті виконання процедури на ПДП отримується інформація за якою визначаються поточні координати порушника та параметри його руху (напрямок руху по відношенню до ОКІ та швидкість). Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність визначення координат порушника з необхідною точністю». Його значення залежить від можливостей обраного методу визначення координат. Ці можливості, в свою чергу залежать, від якості навігаційної системи БпЛА, від використання порушником засобів радіоелектронної боротьби, що ускладнюють визначення його координат.

**Процедура 12.** Доставляння повідомлень з інформацією про порушників у зоні СП від ПДП до служби охорони ОКІ для проведення затримання (знешкодження) порушників.

Під час супроводження порушника інформація про нього від ПДП, з певною ймовірністю, може бути доставлена до служби охорони ОКІ. Досконалість процедури характеризується показником функціональності – «Ймовірність успішного доставлення інформації про порушника до служби охорони». Недоставляння інформації про порушника може бути спричинено, наприклад, умовами поширення радіохвиль, наявністю радіозавад природного або техногенного характеру.

#### **4. Обґрунтування показників ефективності охоронної системи та компонування аналітичних виразів для їх визначення**

В статтях [14, 15] показано, що в якості показників ефективності ОС доцільно використовувати «Ймовірність того, що завдання ОС виконано», «Ймовірність обману користувача ОС», «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково», «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано».

Під час компонування формул для визначення значень показників ефективності запропонованої ОС необхідно врахувати всі можливі варіанти її реакції на перетин порушником зон контролю. Як показано на рис. 1, реакція ОС має початок в момент появи порушника в дальній зоні контролю і завершується в момент закінчення процедури 12.

*Повний перелік варіантів складових реакції КОС.*

Реакція  $A_D$ , полягає в тому, що СССД встановлена в ДЗК виявила порушника, його тип розпізнаний правильно та повідомлення про тип порушника доставлено до СПВІ. В запропонованій стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 1, 2 та 3 для ДЗК.

Реакція  $B_D$ , полягає в тому, що СССД встановлена в ДЗК виявила порушника, але його тип розпізнаний не правильно, повідомлення про тип порушника доставлено до СПВІ. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 1, 2 та 3 для ДЗК.

Реакція  $C_D$ , полягає в тому, що СССД встановлена в ДЗК не виявила порушника. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подією закінчення процедури 1 для ДЗК.

Такі ж реакції властиві для СССД встановленої в БЗК. Для них використаємо аналогічні позначення:  $A_B$ ,  $B_B$ ,  $C_B$ .

Функціональна поведінка ОС при розташуванні сигналізаційних систем КОС в двох зонах контролю передбачає, що рішення про тип порушника приймається після оброблення повідомлень від сигналізаційних систем ДЗК та БЗК за розробленим алгоритмом методом прийняття рішення [15].

Завдання КОС вважається виконаним, якщо порушник виявлений, його тип розпізнаний правильно в кожній з двох зон контролю, на ПДП передано повідомлення з координатами зони СП та часом початку пошуку порушника в ній. Якщо тип порушника визначений в БЗК відрізняється від ДЗК, то в такому випадку, від СПВІ на ПДП для підтвердження передаються обидва повідомлення.

*Повний перелік варіантів реакції БпАК.*

Реакція  $A_C$ , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, ідентифікований, координати визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7, 8, 9, 10 та 11 для зони СП.

Реакція  $B_C$ , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, ідентифікований, але координати не визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7-11.

Реакція  $C_C$ , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, не ідентифікований, але координати визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7-11.

Реакція  $D_C$ , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний правильно, але не ідентифікований та координати не визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7-11.

Реакція  $E_C$ , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, його тип розпізнаний не правильно, але координати визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7, 8, 9, 10 та 11.

Реакція  $F_C$ , полягає в тому, що БпАК виявив порушника, але його тип розпізнаний не правильно та координати не визначені з необхідною точністю. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подіями закінчення процедур 7, 8, 9, 10 та 11.

Реакція  $H_C$ , полягає в тому, що БпАК не виявив порушника. В стохастичній моделі така реакція буде представлена подією закінчення процедури 7.

Завдання БпАК вважається виконаним, якщо після отримання на ПДП повідомлення від КОС в зоні СП порушник буде виявлений, його тип розпізнаний правильно, правильно ідентифікований, координати визначені з необхідною точністю та повідомлення з інформацією про порушника доставлено службі охорони ОКІ.

Приймаючи до уваги описані вище варіанти реакції для кожної складової ОС, можливі такі результати роботи ОС в цілому: 1) «Завдання ОС виконано»; 2) «Обман користувача ОС»; 3) «Завдання ОС виконано частково»; 4) «Завдання ОС не виконано».

На рис. 2 у формі графа представлено всі можливі варіанти реакції запропонованої ОС у складі КОС та БпАК на перетин порушником трьох зон контролю. За графом, представленим на рис. 2, скомпоновані формули для визначення значень показників ефективності у вигляді сум умовних ймовірностей реакцій ОС. Показник ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» – це ймовірність того, що служба охорони ОКІ отримає від ПДП повідомлення про правильно розпізнаного та ідентифікованого порушника і його поточні координати визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП отримано повідомлення від СПВІ про порушника від обох зон контролю КОС. Цей показник будемо представляти сумою умовних априорних ймовірностей:

$$P_{t.ex} = \sum_i p_i^A, \quad (1)$$

де  $p_i^A$  – умовна ймовірність виконання завдання ОС при  $i$ -му варіанті її реакції, для якої в зоні СП має бути представлена реакція  $A_C$ , за умови, що у ДЗК та БЗК були такі варіанти реакції КОС:  $A_D$  і  $A_B$  або  $B_D$  і  $A_B$  або  $A_D$  і  $B_B$  або  $B_D$  і  $B_B$ .

Перша складова формули (1) –  $p_i^A$  має таке обґрунтування: «Завдання ОС виконано», коли служба охорони ОКІ від ПДП отримає повідомлення про правильно розпізнаного, ідентифікованого порушника та його координатами, що визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП від СПВІ отримано повідомлення з правильно розпізнаним типом порушника в обох зонах контролю КОС. З використанням зазначених вище позначень реакцій складових ОС першу складову формули (1) представимо умовною ймовірністю у вигляді:

$$p_1^A = P(A_C | A_D, A_B). \quad (2)$$

Решта умовних ймовірностей для формули (1) наведено в табл. 1.

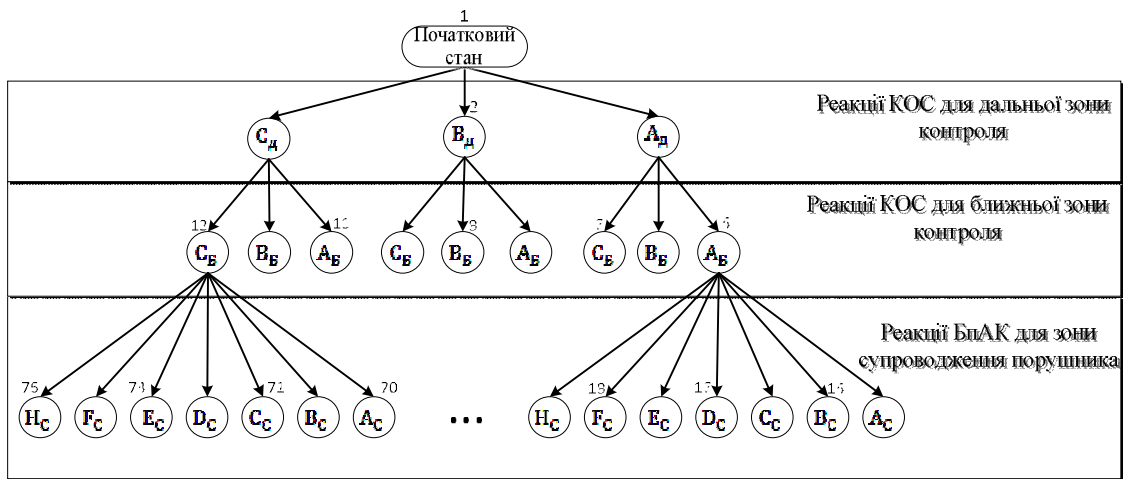


Рис. 2. Всі можливі варіанти реакції охоронної системи на перетин порушником трьох зон контролю (Fig. 2. All possible options for the response of the security system to the intersection of the violator of the three control zones)

Таблиця 1 – Складові показників ефективності охоронної системи, до складу якої входять КОС та БпАК

Показники ефективності ОС			
«Ймовірність того, що завдання ОС виконано», $P_{l.ex}$	«Ймовірність обману користувача ОС», $P_{u.c}$	«Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково», $P_{l.ex.p}$	«Ймовірність того, що завдання ОС не виконано», $P_{l.nex}$
$P(A_C   A_D, A_B)$ , $P(A_C   A_D, B_B)$ , $P(A_C   B_D, A_B)$ , $P(A_C   B_D, B_B)$	$P(E_C   A_D, A_B)$ , $P(F_C   A_D, A_B)$ , $P(E_C   A_D, B_B)$ , $P(F_C   A_D, B_B)$ , $P(E_C   B_D, A_B)$ , $P(F_C   B_D, A_B)$ , $P(E_C   B_D, B_B)$ , $P(F_C   B_D, B_B)$	$P(B_C   A_D, A_B)$ , $P(C_C   A_D, A_B)$ , $P(D_C   A_D, A_B)$ , $P(B_C   A_D, B_B)$ , $P(C_C   A_D, B_B)$ , $P(D_C   A_D, B_B)$ , $P(B_C   B_D, A_B)$ , $P(C_C   B_D, A_B)$ , $P(D_C   B_D, A_B)$ , $P(B_C   B_D, B_B)$ , $P(C_C   B_D, B_B)$ , $P(D_C   B_D, B_B)$	$P(H_C   A_D, A_B)$ , $P(H_C   A_D, B_B)$ , $P(H_C   B_D, A_B)$ , $P(H_C   B_D, B_B)$ , $P(A_C   A_D, C_B)$ , $P(B_C   A_D, C_B)$ , $P(C_C   A_D, C_B)$ , $P(D_C   A_D, C_B)$ , $P(E_C   A_D, C_B)$ , $P(F_C   A_D, C_B)$ , $P(H_C   A_D, C_B)$ , $P(A_C   B_D, C_B)$ , $P(B_C   B_D, C_B)$ , $P(C_C   B_D, C_B)$ , $P(D_C   B_D, C_B)$ , $P(E_C   B_D, C_B)$ , $P(F_C   B_D, C_B)$ , $P(H_C   B_D, C_B)$ , $P(A_C   C_D, A_B)$ , $P(B_C   C_D, A_B)$ , $P(C_C   C_D, A_B)$ , $P(D_C   C_D, A_B)$ , $P(E_C   C_D, A_B)$ , $P(F_C   C_D, A_B)$ , $P(H_C   C_D, A_B)$ , $P(A_C   C_D, B_B)$ , $P(B_C   C_D, B_B)$ , $P(C_C   C_D, B_B)$ , $P(D_C   C_D, B_B)$ , $P(E_C   C_D, B_B)$ , $P(F_C   C_D, B_B)$ , $P(H_C   C_D, B_B)$ , $P(A_C   C_D, C_B)$ , $P(B_C   C_D, C_B)$ , $P(C_C   C_D, C_B)$ , $P(D_C   C_D, C_B)$ , $P(E_C   C_D, C_B)$ , $P(F_C   C_D, C_B)$ , $P(H_C   C_D, C_B)$

За аналогічними міркуваннями скомпоновані формули розрахунку інших показників ефективності ОС. Показник «Ймовірність обману користувача ОС»:

$$P_{u.c} = \sum_j p_j^B, \tag{3}$$

де  $p_j^B$  – умовна ймовірність «обману» користувача ОС в  $j$ -му варіанті її реакції, для якої в зоні СП має бути представлена реакція  $E_C$  або  $F_C$ , за умови, що у ДЗК та БЗК були такі варіанти реакції КОС:  $A_D$  і  $A_B$  або  $B_D$  і  $A_B$  або  $A_D$  і  $B_B$  або  $B_D$  і  $B_B$ .

Перша складова формули (3) –  $p_1^B$  має таке обґрунтування: «Обман користувача ОС», коли служба охорони ОКІ отримає від ПДП повідомлення про порушника тип якого розпізнаний неправильно, але координати визначені з необхідною точністю, за умови, що в ПДП від СПВІ отримані повідомлення з неправильно розпізнаним типом порушника в обох зон контролю КОС. Такий варіант реакції, представимо умовною ймовірністю у вигляді:

$$p_1^B = P(E_C | B_D, B_B). \tag{4}$$

Решта умовних ймовірностей для формули (3) наведено в табл. 1.

Показник «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково»:

$$P_{l.ex.p} = \sum_k p_k^C, \tag{5}$$

де  $p_k^C$  – умовна ймовірність того, що завдання ОС виконано частково в  $k$ -му варіанті реакції, для якої в зоні СП має бути представлена реакція  $B_C$  або  $C_C$  або  $D_C$ , за умови, що у ДЗК та БЗК були такі варіанти реакції КОС:  $A_D$  і  $A_B$  або  $B_D$  і  $A_B$  або  $A_D$  і  $B_B$  або  $B_D$  і  $B_B$ .

Перша складова формули (5) –  $p_1^C$  має таке обґрунтування: «Завдання ОС виконано частково», коли служба охорони ОКІ від ПДП отримає повідомлення про правильно розпізнаного та ідентифікованого порушника, але його поточні координати не визначені з необхідною точністю, за умови, що в

ПДП від СПВІ отримані повідомлення з правильно розпізнаним типом порушника в обох зонах контролю КОС. Такий варіант реакції, представимо умовною імовірністю у вигляді:

$$p_1^C = P(B_C | A_D, A_B). \quad (6)$$

Решта умовних імовірностей для формули (5) наведено в табл. 1.

Показник «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано»:

$$P_{l.n.ex} = \sum_k p_l^D, \quad (7)$$

де  $p_l^D$  – умовна імовірність не виконання завдання ОС в  $l$ -му варіанті її реакції, для якої має бути представлена реакція «Порушник не виявлений» в одній або в двох або трьох зонах контролю.

Перша складова формули (7) –  $p_1^D$  має таке обґрунтування: «Завдання ОС не виконано», коли

$$P_{l.ex} = P(A_C | A_D, A_B) + P(A_C | A_D, B_B) + P(A_C | B_D, A_B) + P(A_C | B_D, B_B), \quad (9)$$

$$P_{l.c} = P(E_C | A_D, A_B) + P(F_C | A_D, A_B) + P(E_C | A_D, B_B) + P(F_C | A_D, B_B) + P(E_C | B_D, A_B) + P(F_C | B_D, A_B) + P(E_C | B_D, B_B) + P(F_C | B_D, B_B); \quad (10)$$

$$P_{l.ex.p} = P(B_C | A_D, A_B) + P(C_C | A_D, A_B) + P(D_C | A_D, A_B) + P(B_C | A_D, B_B) + P(C_C | A_D, B_B) + P(D_C | A_D, B_B) + P(B_C | B_D, A_B) + P(C_C | B_D, A_B) + P(D_C | B_D, A_B) + P(B_C | B_D, B_B) + P(C_C | B_D, B_B) + P(D_C | B_D, B_B); \quad (11)$$

$$P_{l.n.ex} = P(H_C | A_D, A_B) + P(H_C | A_D, B_B) + P(H_C | B_D, A_B) + P(H_C | B_D, B_B) + P(A_C | A_D, C_B) + P(B_C | A_D, C_B) + P(C_C | A_D, C_B) + P(D_C | A_D, C_B) + \dots + P(B_C | C_D, B_B) + P(C_C | C_D, B_B) + P(D_C | C_D, B_B) + P(E_C | C_D, B_B) + P(F_C | C_D, B_B) + P(H_C | C_D, B_B) + \dots + P(H_C | C_D, C_B). \quad (12)$$

Розгляд аналітичних виразів для визначення показників ефективності (9) – (12) дає змогу зробити висновок, що для визначення їх складових є доцільним використання дискретно-неперервної стохастичної моделі реакції ОС на перетин порушником трьох зон контролю.

## 5. Показники функціональності складових охоронної системи

В даному розгляді складовими охоронної системи вважаємо комплекс охоронної сигналізації та безпілотний авіаційний комплекс. Далі подано перелік показників функціональності складових ОС та середні значення інтервалів часу, що характеризують тривалість виконання описаних в розділі 3 процедур. Комплекс охоронної сигналізації в розробленій стохастичній моделі функціональної поведінки ОС представлено наступними показниками функціональності його складових:

- ймовірність виявлення порушника сигналізаційною системою КОС –  $P_{det UGS}$ ;

- ймовірність правильного розпізнавання типу порушника сигналізаційною системою КОС –  $P_{id UGS}$ ;

- ймовірність успішного доставлення повідомлення про порушника на СПВІ –  $P_d UGS$ ;

- середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в ДЗК (в БЗК) до моменту завер-

шення охорони ОКІ від ПДП не отримує повідомлення про виявлення порушника в зоні СП, за умови, що в ПДП від СПВІ отримані повідомлення з правильно розпізнаним типом порушника в обох зонах контролю КОС. Такий варіант реакції, представимо умовною імовірністю у вигляді:

$$p_1^D = P(H_C | A_D, A_B). \quad (8)$$

Решта умовних імовірностей для формули (7) наведено в табл. 1.

Зауважимо, що сформовані умовні імовірності для формул (1), (3), (5), (7) представлені в табл. 1 є апіорними ймовірностями, на що треба звернути увагу під час вибору типу математичної моделі реакції системи на перетин порушником зон контролю та її розробленні.

За формулами (1), (3), (5), (7) з використанням даних з таблиці 1 скомпоновані формули для визначення показників ефективності:

шення формування сигналу для процедури розпізнавання його типу, завершення процедури 1 для ДЗК (процедури 4 для БЗК) –  $T_{det 1} (T_{det 2})$ .

Безпілотний авіаційний комплекс в розробленій стохастичній моделі функціональної поведінки ОС представлено наступними показниками функціональності його складових:

- ймовірність виявлення порушника БпАК –  $P_{det UAV}$ ;

- ймовірність правильного розпізнавання типу порушника БпАК –  $P_{id UAV}$ ;

- ймовірність правильної ідентифікації порушника –  $P_{des UAV}$ ;

- ймовірність визначення координат порушника з необхідною точністю –  $P_{d.c UAV}$ ;

- ймовірність успішного доставлення інформації про порушника від ПДП до служби охорони ОКІ –  $P_d UAV$ ;

- середнє значення інтервалу часу від моменту появи порушника в зоні СП до моменту його виявлення (завершення процедури 8) –  $T_{det 3}$ .

## 6. Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи

Авторами статті запропонована стохастична модель функціональної поведінки ОС, яка відтво-

рює її реакції на перетин порушником трьох зон контролю з використанням технології моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [12]. Розроблення стохастичної моделі виконано в такій послідовності.

**Еман 1.** Визначення базових подій реакції ОС.

Для розроблення моделі функціональної поведінки ОС у вигляді графа станів і переходів необхідно визначити базові події (БП), які представляють усі процеси й процедури, що формують варіанти реакції

ОС. А також показати зовнішні процеси, з якими взаємодіють складові ОС протягом виконання завдання та сформувані вектор станів, який представлятиме зміну станів згідно реакції зазначеної системи.

Згідно з процедурами, які передбачені алгоритмом функціонування ОС (рисунок 1), складено перелік подій. Ці події представляють початок і закінчення кожної процедури, тому представлені в табл. 2 попарно.

Таблиця 2 – Пари подій, які фіксують початок і закінчення процедур, що формують реакцію ОС на перетин порушником зон контролю

№ з/п	Подія-початок	Подія-закінчення (базова подія)	Середнє значення тривалості процедури	Інтенсивність появи базової події
1	Початок перебування порушника в ДЗК	БП1: Закінчення процедури виявлення порушника в ДЗК	$T_{det1}$	$\lambda_1 = 1/T_{det1}$
2	Початок процедури розпізнавання типу порушника, виявленого в ДЗК	БП2: Закінчення процедури розпізнавання типу порушника виявленого в ДЗК	$t_{id1} \ll T_{det1}$	$\lambda_{id1} = 1/t_{id1}$
3	Початок процедури доставляння повідомлення про порушника від сигналізаційної системи ДЗК до СПВІ	БП3: Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушника від сигналізаційної системи ДЗК до СПВІ	$t_{d1} \ll T_{det1}$	$\lambda_{d1} = 1/t_{d1}$
4	Початок перебування порушника в БЗК	БП4: Закінчення процедури виявлення порушника в БЗК	$T_{det2}$	$\lambda_2 = 1/T_{det2}$
5	Початок процедури розпізнавання типу порушника, виявленого в БЗК	БП5: Закінчення процедури розпізнавання типу порушника, виявленого в БЗК	$t_{id2} \ll T_{det2}$	$\lambda_{id2} = 1/t_{id2}$
6	Початок процедури доставляння повідомлення про порушника від сигналізаційної системи БЗК до СПВІ	БП6: Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушника від сигналізаційної системи БЗК до СПВІ	$t_{d2} \ll T_{det2}$	$\lambda_{d2} = 1/t_{d2}$
7	Початок процедури прийняття рішення про тип порушника в СПВІ за повідомленнями сигналізаційних систем ДЗК і БЗК	БП7: Закінчення процедури прийняття рішення про тип порушника в СПВІ за повідомленнями сигналізаційних систем з ДЗК і БЗК	$t_D \ll T_{det2}$	$\lambda_D = 1/t_D$
8	Початок перебування порушника в зоні СП	БП8: Закінчення процедури виявлення порушника БпАК в зоні СП	$T_{det3}$	$\lambda_3 = 1/T_{det3}$
9	Початок процедури розпізнавання типу порушника виявленого в зоні СП	БП9: Закінчення процедури розпізнавання типу порушника виявленого в зоні СП	$t_{id3} \ll T_{det3}$	$\lambda_{id3} = 1/t_{id3}$
10	Початок процедури ідентифікації порушника виявленого БпАК	БП10: Закінчення процедури ідентифікації порушника виявленого БпАК	$t_{des} \ll T_{det3}$	$\lambda_{des} = 1/t_{des}$
11	Початок процедури визначення координат порушника з необхідною точністю	БП11: Закінчення процедури визначення координат порушника з необхідною точністю	$t_{d.c} \ll T_{det3}$	$\lambda_{d.c} = 1/t_{d.c}$
12	Початок процедури доставляння повідомлення про порушника від ПДП до служби охорони	БП12: Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушника від ПДП до служби охорони	$t_{d3} \ll T_{det3}$	$\lambda_{d3} = 1/t_{d3}$

Проведемо аналіз представлених в табл. 2 базових подій з метою віднесення частини з них до категорії зведених базових подій (ЗвБП). Оскільки тривалості процедур: розпізнавання типу порушника  $t_{id}$ , ідентифікації  $t_{des}$ , визначення координат  $t_{d.c}$  та доставляння повідомлення про порушника  $t_d$  є значно меншими від тривалостей процедури виявлення порушника в зонах контролю  $T_{det1}$ ,  $T_{det2}$ ,  $T_{det3}$ , то в моделі їх значення приймаються рівними нулю. Тому далі події 1, 4, 8 вважатимуться базовими, а події 2, 3, 5 – 7, 9 – 12 зведеними до них відповідно. Виходячи з цього, в розробленій моделі реакції ОС на перетин порушником зон контролю використано наступні БП.

**Базова подія 1** “Закінчення процедури виявлення порушників в ДЗК”. З нею зведені: подія “Закінчення процедури розпізнавання типу порушників виявлених в ДЗК” та подія “Закінчення процедури доставляння повідомлень про порушників від ДЗК до СПВІ”. Для цих подій використано позначення ЗвБП2 та ЗвБП3.

**Базова подія 4** “Закінчення процедури виявлення порушників в БЗК”. З нею зведені: подія “Закінчення процедури розпізнавання типу порушників виявлених

в БЗК”, подія “Закінчення процедури доставляння повідомлень про порушників від БЗК до СПВІ” та подія “Закінчення процедури прийняття рішення про тип порушників виявлених КОС”. Для цих подій використано позначення ЗвБП5, ЗвБП6 та ЗвБП7.

**Базова подія 8** “Закінчення процедури виявлення порушників в зоні СП”. З нею зведені: подія “Закінчення процедури розпізнавання типу порушників виявлених БпАК”, подія “Закінчення процедури ідентифікації порушників”, подія “Закінчення процедури визначення координат порушників із необхідною точністю” та подія “Закінчення процедури доставляння повідомлення про порушників від ПДП до служби охорони ОК”. Для цих подій використано позначення ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11 та ЗвБП12.

**Еман 2.** Призначення компонент вектора стану стохастичної моделі функціональної поведінки охоронної системи при перетині порушником трьох зон контролю.

Для побудови моделі формується вектор станів, який складається з певної кількості компонент. Ступінь адекватності моделі, що розробляється, визначає, разом з базовими подіями, кількість призначених



компонент. Запропоновано кожен стан ОС описувати вектором, який складається з шістьох компонент:

V1 – показує варіанти реакції КОС в ДЗК після базової події БП1, які формуються урахуванням зведених з нею базових подій ЗвБП2 та ЗвБП3; початкові значення, які приймає ця і всі наступні компоненти подані нижче;

V2 – показує варіанти реакції КОС в БЗК після БП4, які формуються урахуванням зведених з нею базових подій ЗвБП5, ЗвБП6 та ЗвБП7;

V3 – показує варіанти результатів виконання завдання КОС по прийнятому в СПВІ рішенню про тип виявленого порушника за повідомленнями СССД встановлених в ДЗК та БЗК (допоміжна компонента);

V4 – показує варіанти реакції БпАК після БП8, які формуються урахуванням зведених з нею ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11 та ЗвБП12;

V5 – показує варіанти результатів виконання завдання БпАК за прийнятою на ПДП інформацією (допоміжна компонента);

V6 – показує варіанти результатів виконання завдання ОС за результатами виконання завдань його складовими: КОС в дальній і ближній зонах контролю та БпАК в зоні СП.

Варіанти реакції КОС на перетин порушником ДЗК та БЗК є однотипними, тому компоненти V1 та V2 можуть приймати такі значення:

«1» – коли порушник у ЗК виявлений, його тип розпізнаний правильно, повідомлення до СПВІ доставлено;

«2» – коли порушник у ЗК виявлений, але його тип розпізнаний не правильно, повідомлення до СПВІ доставлено;

«3» – коли порушник у ЗК не виявлений.

Компонента V4 представляє реакції БпАК на перетин порушником зони СП, її можливі значення:

«1» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; його тип розпізнаний правильно; правильно ідентифікований; координати визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«2» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; тип порушника розпізнаний правильно; правильно ідентифікований; але координати порушника не визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«3» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; тип порушника розпізнаний правильно; але не правильно ідентифікований; координати порушника визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«4» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; тип порушника розпізнаний правильно; але не правильно ідентифікований; координати не визначені з необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«5» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; але тип порушника розпізнаний неправильно; координати визначені із необхідною

точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«6» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК виявлений; але тип порушника розпізнаний неправильно, координати не визначені із необхідною точністю; повідомлення з інформацією про порушника до служби охорони ОКІ доставлено;

«7» – коли порушник в зоні СП за допомогою БпАК не виявлений.

Значення компонент V3, V5 та V6:

«1» – якщо завдання КОС, завдання БпАК і відповідно завдання ОС виконано;

«2» – якщо результатом роботи КОС, БпАК і відповідно ОС є «обман користувача»;

«3» – якщо завдання КОС, завдання БпАК і відповідно завдання ОС виконано частково;

«4» – якщо завдання КОС, завдання БпАК і відповідно завдання ОС не виконано.

Зауважимо, що у початковому стані значення компонент V1, V2, V3, V4, V5, V6 дорівнюють 0.

Етап 3. Розроблення моделі функціональної поведінки ОС у вигляді графа станів і переходів з використанням базових подій та вектора станів.

У відповідності до представленого на рис. 1 процесу, що відтворює реакції ОС на перетин порушником трьох зон контролю, та представленими в табл. 2 актуальними для представлення в моделі парами подій, які фіксують початок і закінчення процедур, що формують реакції ОС на перетин порушниками зон контролю, розробляється граф станів та переходів.

Розроблення графа станів та переходів виконується в такій послідовності (результати виконання кроків занесені в табл. 3):

*Крок 1.* Встановлюємо початковий (перший) стан графа (ПС). Цей стан визначають початкові значення компонент вектора станів:  $V1:=0, V2:=0, V3:=0, V4:=0, V5:=0, V6:=0$ .

*Крок 2.* Розглядаємо стан 1, для якого є актуальними базова подія БП1 та зведені з нею ЗвБП2 і ЗвБП3, і які дають три альтернативні продовження випадкового процесу.

Перше альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення порушників в ДЗК (БП1) і процедури розпізнавання їх типу (ЗвБП2), яке в графі станів представлене переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det} \cdot P_{id}$ . Ця альтернатива спричиняє зміну компоненти V1 вектора станів:  $V1:=1$ . Отримано новий стан 2. Фіксуємо перехід з стану 1 в стан 2; формула розрахунку інтенсивності такого переходу (ФРП) має вигляд:  $\lambda_1 \cdot P_{det} \cdot P_{id}$ .

Друге альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення порушників у ДЗК (БП1) і не успішного завершення процедури розпізнавання їх типу (ЗвБП2), яке в графі станів представлене переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det}(1 - P_{id})$ . Ця альтернатива спричиняє зміну компоненти V1 вектора станів:  $V1:=2$ . Отримано новий стан 3. Фіксуємо перехід з стану 1 в стан 3; ФРП має вигляд:  $\lambda_1 \cdot P_{det}(1 - P_{id})$ .

Третє альтернативне продовження є наслідком неуспішних завершень процедури виявлення порушників у ДЗК (БП1), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $(1 - P_{det})$ . Ця альтернатива спричиняє зміну компоненти V1 вектора станів:  $V1:=3$ . Отримано новий

стан 4. Фіксуємо перехід з стану 1 в стан 4; ФРПІ має вигляд:  $\lambda_1 \cdot (1 - P_{det})$ .

Кроки 3 – 5. Аналогічно виконується розгляд наступних 2, 3 і 4 станів, які визначаються після розгляду стану 1, а саме кроків з третього по п'ятий. Виконання цих кроків дає нові стани графа з 5 по 13.

Таблиця 3 – Модель функціональної поведінки охоронної системи, у складі КОС та БпАК, на перетин порушниками трьох зон контролю у вигляді графа станів та переходів

Крок №	Стан і актуальна БП	Імовірності альтернативних продовжень процесів	Вектор стану						№ стану	Перехід з стану в стан	ФРПІ
			V1	V2	V3	V4	V5	V6			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ПС	-	0	0	0	0	0	0	1	-	-
2	1БП1 (ЗвБП2, ЗвБП3)	$P_{det1} \cdot P_{id1}$	1	0	0	0	0	0	2	1→2	$\lambda_1 \cdot P_{det1} \cdot P_{id1}$
		$P_{det1} (1 - P_{id1})$	2	0	0	0	0	0	3	1→3	$\lambda_1 \cdot P_{det1} (1 - P_{id1})$
		$(1 - P_{det1})$	3	0	0	0	0	0	4	1→4	$\lambda_1 (1 - P_{det1})$
3	2БП4 (ЗвБП5, ЗвБП6, ЗвБП7)	$P_{det2} \cdot P_{id2}$	1	1	1	0	0	0	5	2→5	$\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2}$
		$P_{det2} (1 - P_{id2})$	1	2	3	0	0	0	6	2→6	$\lambda_2 \cdot P_{det2} (1 - P_{id2})$
		$(1 - P_{det2})$	1	3	4	0	0	0	7	2→7	$\lambda_2 (1 - P_{det2})$
4	3БП4 (ЗвБП5, ЗвБП6, ЗвБП7)	$P_{det2} \cdot P_{id2}$	2	1	3	0	0	0	8	3→8	$\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2}$
		$P_{det2} (1 - P_{id2})$	2	2	2	0	0	0	9	3→9	$\lambda_2 \cdot P_{det2} (1 - P_{id2})$
		$(1 - P_{det2})$	2	3	4	0	0	0	10	3→10	$\lambda_2 (1 - P_{det2})$
5	4БП4 (ЗвБП5, ЗвБП6, ЗвБП7)	$P_{det2} \cdot P_{id2}$	3	1	4	0	0	0	11	4→11	$\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2}$
		$P_{det2} (1 - P_{id2})$	3	2	4	0	0	0	12	4→12	$\lambda_2 \cdot P_{det2} (1 - P_{id2})$
		$(1 - P_{det2})$	3	3	4	0	0	0	13	4→13	$\lambda_2 (1 - P_{det2})$
6	5БП8 (ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11, ЗвБП12)	$P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$	1	1	1	1	1	1	14	5→14	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$
		$P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$	1	1	1	2	3	3	15	5→15	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$
		$P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) P_{d.c}$	1	1	1	3	3	3	16	5→16	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) P_{d.c}$
		$P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) (1 - P_{d.c})$	1	1	1	4	3	3	17	5→17	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) (1 - P_{d.c})$
		$P_{det3} (1 - P_{id3}) P_{d.c}$	1	1	1	5	2	3	18	5→18	$\lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3}) P_{d.c}$
		$P_{det3} (1 - P_{id3}) (1 - P_{d.c})$	1	1	1	6	2	3	19	5→19	$\lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3}) (1 - P_{d.c})$
		$(1 - P_{det3})$	1	1	1	7	4	4	20	5→20	$\lambda_3 (1 - P_{det3})$
...											
14	13БП8 (ЗвБП9, ЗвБП10)	$P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$	3	3	4	1	1	4	70	13→70	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$
		$P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$	3	3	4	2	3	4	71	13→71	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$
		$P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) P_{d.c}$	3	3	4	3	3	4	72	13→72	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) P_{d.c}$
		$P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) (1 - P_{d.c})$	3	3	4	4	3	4	73	13→73	$\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec}) (1 - P_{d.c})$
		$P_{det3} (1 - P_{id3}) P_{d.c}$	3	3	4	5	2	4	74	13→74	$\lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3}) P_{d.c}$
		$P_{det3} (1 - P_{id3}) (1 - P_{d.c})$	3	3	4	6	2	4	75	13→75	$\lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3}) (1 - P_{d.c})$
		$(1 - P_{det3})$	3	3	4	7	4	4	76	13→76	$\lambda_3 (1 - P_{det3})$

Крок 6. Розглядаємо стан 5, для якого є актуальними базова подія БП8 та зведені з нею ЗвБП9, ЗвБП10, ЗвБП11 і ЗвБП12, і які дають сім альтернативних продовжень випадкового процесу.

Перше альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення порушників в зоні СП (БП8), розпізнавання (підтвердження) типу порушників виявлених БпАК (ЗвБП9), їх ідентифікації (ЗвБП10) і визначення координат з необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$ .

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів:  $V4:=1, V5:=1, V6:=1$ . Отримано новий стан 14. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 14; ФРПІ має вигляд:  $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c}$ .

Друге альтернативне продовження є наслідком успішних завершень процедури виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8), розпізнавання типу порушників виявлених БпАК (ЗвБП9), їх ідентифікації (ЗвБП10) і не успішних завершень процедури визначення координат із необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c})$ .

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів:  $V4:=2, V5:=3, V6:=3$ . Отримано новий стан 15. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 15; ФРІП має вигляд:  $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec}(1-P_{d.c})$ .

*Третє альтернативне продовження* є наслідком успішних завершень процедури виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8), розпізнавання їх типу (ЗвБП9), визначення їх координат з необхідною точністю (ЗвБП11) і не успішних завершень процедури ідентифікації порушників (ЗвБП10), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det3} \cdot P_{id3}(1-P_{dec})P_{d.c}$ .

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів:  $V4:=3, V5:=3, V6:=3$ . Отримано новий стан 16. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 16; ФРІП має вигляд:  $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3}(1-P_{dec})P_{d.c}$ .

*Четверте альтернативне продовження* є наслідком успішних завершень процедур виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8) та розпізнавання їх типу (ЗвБП9) і не успішних завершень процедур ідентифікації порушників (ЗвБП10) та визначення їх координат з необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det3} \cdot P_{id3}(1-P_{dec})(1-P_{d.c})$ .

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів:  $V4:=4, V5:=3, V6:=3$ . Отримано новий стан 17. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 17; ФРІП має вигляд:  $\lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3}(1-P_{dec})(1-P_{d.c})$ .

*П'яте альтернативне продовження* є наслідком успішних завершень процедур виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8) та процедур визначення їх координат із необхідною точністю (ЗвБП11) і не успішних завершень процедури розпізнавання типу порушників (ЗвБП9), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю  $P_{det3}(1-P_{id3})P_{d.c}$ . Ця альтернатива спричиняє змі-

ну компонент вектора станів:  $V4:=5, V5:=2, V6:=3$ . Отримано новий стан 18. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 18; ФРІП має вигляд:  $\lambda_3 \cdot P_{det3}(1-P_{id3})P_{d.c}$ .

*Шосте альтернативне продовження* є наслідком успішних завершень процедури виявлення БпАК порушників в зоні СП (БП8) і не успішних завершень процедур розпізнавання типу порушників виявлених БпАК (ЗвБП9) та визначення їх диферент із необхідною точністю (ЗвБП11), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $P_{det3}(1-P_{id3})(1-P_{d.c})$ .

Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів:  $V4:=6, V5:=2, V6:=3$ . Отримано новий стан 19. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 19; ФРІП має вигляд:  $\lambda_3 \cdot P_{det3}(1-P_{id3})(1-P_{d.c})$ .

*Сьоме альтернативне продовження* є наслідком не успішних завершень процедури виявлення порушників в зоні СП (БП8), яке в графі станів представлено переходом в наступний стан з ймовірністю:  $(1-P_{det3})$ . Ця альтернатива спричиняє зміну компонент вектора станів:  $V4:=7, V5:=4, V6:=4$ . Отримано новий стан 20. Фіксуємо перехід з стану 5 в стан 20; ФРІП має вигляд:  $\lambda_3(1-P_{det3})$ .

Аналогічно розглянуто стани з 6-го по 13-й і виконані кроки з 7-го по 14-й. Отриманий граф станів і переходів має 76 станів.

**Еман 4.** Формування дискретно-неперервної стохастичної моделі ОС у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена.

Стохастична модель функціональної поведінки ОС на перетин порушниками трьох зон контролю, при встановленні КОС у дальній та ближній зонах контролю та використанні БпАК для забезпечення функціонування зони СП, зображена у вигляді системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned}
 \frac{dQ_1(t)}{dt} &= -(\lambda_1 \cdot P_{det1} \cdot P_{id1} + \lambda_1 \cdot P_{det1}(1-P_{id1}) + \lambda_1(1-P_{det1})) \cdot Q_1(t); \\
 \frac{dQ_2(t)}{dt} &= \lambda_1 \cdot P_{det1} \cdot P_{id1} \cdot Q_1(t) - (\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} + \lambda_2 \cdot P_{det2}(1-P_{id2}) + \lambda_2(1-P_{det2})) \cdot Q_2(t); \\
 \frac{dQ_3(t)}{dt} &= \lambda_1 \cdot P_{det1}(1-P_{id1}) \cdot Q_1(t) - (\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} + \lambda_2 \cdot P_{det2}(1-P_{id2}) + \lambda_2(1-P_{det2})) \cdot Q_3(t); \\
 \frac{dQ_4(t)}{dt} &= \lambda_1(1-P_{det1}) \cdot Q_1(t) - (\lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} + \lambda_2 \cdot P_{det2}(1-P_{id2}) + \lambda_2(1-P_{det2})) \cdot Q_4(t); \\
 \frac{dQ_5(t)}{dt} &= \lambda_2 \cdot P_{det2} \cdot P_{id2} \cdot Q_2(t) - X_3 \cdot Q_5(t); \\
 \frac{dQ_6(t)}{dt} &= \lambda_2 \cdot P_{det2}(1-P_{id2}) \cdot Q_2(t) - X_3 \cdot Q_6(t); \\
 \frac{dQ_7(t)}{dt} &= \lambda_2(1-P_{det2}) \cdot Q_2(t) - X_3 \cdot Q_7(t); \\
 &\dots \\
 \frac{dQ_{13}(t)}{dt} &= \lambda_2(1-P_{det2}) \cdot Q_4(t) - X_3 \cdot Q_{13}(t); \\
 \frac{dQ_{14}(t)}{dt} &= \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c} \cdot Q_5(t); \\
 \frac{dQ_{15}(t)}{dt} &= \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec}(1-P_{d.c}) \cdot Q_5(t); \\
 &\dots
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\frac{dQ_{75}(t)}{dt} = \lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3})(1 - P_{d.c})Q_{13}(t);$$

$$\frac{dQ_{76}(t)}{dt} = \lambda_3(1 - P_{det3})Q_{13}(t),$$

де  $Q_i(t)$  – імовірність перебування в  $i$ -му стані графа на інтервалі часу  $t$ ;

$$X_3 = \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} \cdot P_{d.c} + \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} \cdot P_{dec} (1 - P_{d.c}) + \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec})P_{d.c} +$$

$$+ \lambda_3 \cdot P_{det3} \cdot P_{id3} (1 - P_{dec})(1 - P_{d.c}) + \lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3})P_{d.c} + \lambda_3 \cdot P_{det3} (1 - P_{id3})(1 - P_{d.c}) + \lambda_3(1 - P_{det3}).$$

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (13) дає змогу розрахувати значення показників ефективності запропонованої ОС (рис. 1) згідно виразів (9)-(12) за такими формулами:

$$P_{t.ex} = Q_{14}(t) + Q_{21}(t) + Q_{35}(t) + Q_{42}(t); \quad (14)$$

$$P_{u.c} = Q_{18}(t) + Q_{19}(t) + Q_{25}(t) + Q_{26}(t) + Q_{39}(t) + Q_{40}(t) + Q_{46}(t) + Q_{47}(t); \quad (15)$$

$$P_{t.ex.p} = \sum_{i=15}^{17} Q_i(t) + \sum_{i=22}^{24} Q_i(t) + \sum_{i=36}^{38} Q_i(t) + \sum_{i=43}^{45} Q_i(t); \quad (16)$$

$$P_{t.n.ex} = Q_{20}(t) + \sum_{i=27}^{34} Q_i(t) + Q_{41}(t) + \sum_{i=48}^{76} Q_i(t). \quad (17)$$

**Етап 5.** Складання переліку актуальних експериментів та їх проведення для валідації розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі.

## 7. Експерименти

Для валідації розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі проведено експериментальні дослідження обраних залежностей, характер змін яких можна передбачити. Такими залежностями є залежності показників ефективності ОС від значень показників функціональності його складових.

Нагадаємо, що показниками функціональності складових КОС є: імовірність виявлення порушника ( $P_{det1}$ ) та імовірність правильного розпізнавання його типу ( $P_{id1}$ ). А показниками функціональності складових БпАК: імовірність виявлення порушника ( $P_{det2}$ ), імовірність правильного розпізнавання його типу ( $P_{id2}$ ), імовірність успішної ідентифікації ( $P_{dec}$ ) та імовірність визначення координат порушника з необхідною точністю ( $P_{d.c}$ ).

У валідаційних експериментах, значення всіх показників функціональності складових КОС і БпАК прийняті однаковими. Тому на рисунках 3, 4, 5 і 6 показники функціональності всіх складових КОС отримали позначення  $P_{UGS}$ , а показники функціональності всіх складових БпАК –  $P_{UAV}$ .

**Експеримент №1.** Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» –  $P_{t.ex}$ , від зростання значень показників функціональності її складових.

Передбачаємо, що при зростанні значень ймовірностей  $P_{UGS}$  і  $P_{UAV}$ , значення показника «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» ( $P_{t.ex}$ ) також буде зростати. На рис. 3, а представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

**Експеримент №2.** Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність об-

ману користувача ОС» ( $P_{u.c}$ ) від зростання значень показників функціональності його складових: КОС ( $P_{UGS}$ ) та БпАК ( $P_{UAV}$ ).

Передбачаємо, що показник «Ймовірність обману користувача ОС» буде мати максимальне значення, коли значення показників функціональності складових системи  $P_{UGS}$  і  $P_{UAV}$ , знаходяться на інтервалі 0,5-0,7. На рис. 3, б представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

**Експеримент №3.** Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково» ( $P_{t.ex.p}$ ) від зростання значень показників функціональності його складових: КОС ( $P_{UGS}$ ) та БпАК ( $P_{UAV}$ ).

Передбачаємо, що показник «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково» буде мати максимальне значення, коли значення показників функціональності складових системи  $P_{UGS}$  і  $P_{UAV}$ , знаходяться на інтервалі 0,6-0,8. На рис. 3, в представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

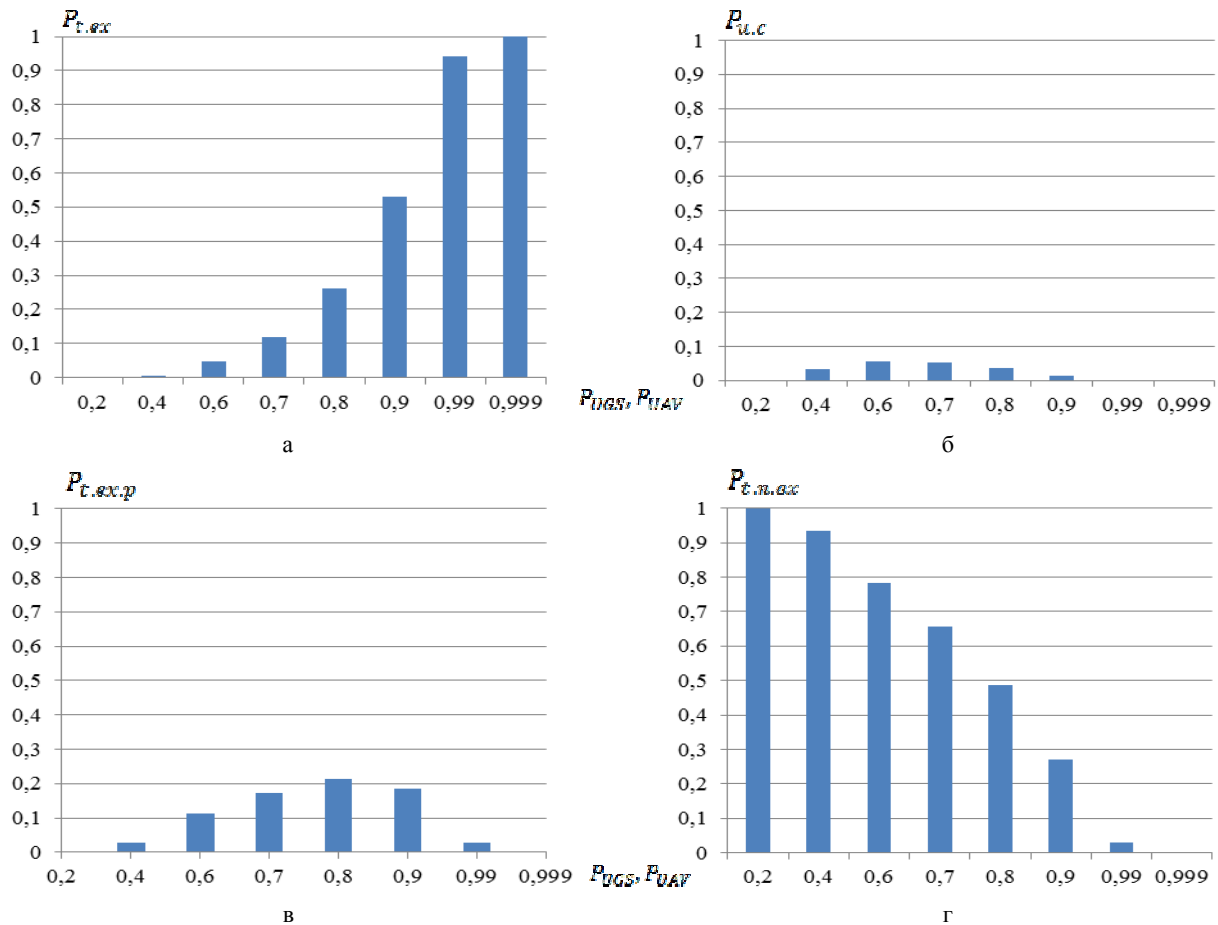
**Експеримент №4.** Дослідження залежності значень показника ефективності ОС «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано» ( $P_{t.n.ex}$ ) від зростання значень показників функціональності його складових: КОС ( $P_{UGS}$ ) та БпАК ( $P_{UAV}$ ).

Передбачаємо, що при зростанні значень ймовірностей  $P_{UGS}$  і  $P_{UAV}$ , значення показника «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано» –  $P_{t.n.ex}$  буде зменшуватись. На рис. 3, г представлена залежність, отримана на розробленій моделі.

Зауважимо, що з практичної точки зору розглядати залежності показників ефективності ОС для значень  $P_{UGS}$  і  $P_{UAV}$  менше 0,5 не доцільно, але є необхідним для висновків за результатами валідації моделі.

Результати всіх валідаційних експериментів, показані на рис. 3, дають право зробити висновок, що характер зміни розрахованих кількісних залежностей показників ефективності ОС від показників функціональності його складових відповідає передбаченим якісним змінам цих залежностей.

Проведені експерименти з використанням розробленої дискретно-неперервної стохастичної моделі функціональної поведінки ОС дають підстави вважати, що результати, які будуть отримані під час подальших експериментальних досліджень є достовірними.



**Рис. 3.** Залежність значень показників  $P_{t.ex}$  (а),  $P_{u.c}$  (б),  $P_{t.ex.p}$  (в) та  $P_{t.n.ex}$  (г) від значень показників  $P_{UGS}$  і  $P_{UAV}$  (Fig. 3. Dependence of indicators values  $P_{t.ex}$  (а),  $P_{u.c}$  (б),  $P_{t.ex.p}$  (в) &  $P_{t.n.ex}$  (г) from the values of indicators  $P_{UGS}$  &  $P_{UAV}$ )

## 8. Результати

Для дослідження потенційної ефективності реалізації запропонованої охоронної системи проведені віртуальні експерименти за її трьома варіантами. *Варіант №1:* ОС у складі розвідувально-сигналізаційного комплексу (РСК) 1К18 «Реалія» [10] та БпАК типу RQ-11 «Raven» [17]. *Варіант №2:* ОС у складі сучасного РСК типу «Classic 2000» [10] та БпАК поля бою [17]. *Варіант №3:* ОС у складі РСК, значення показників функціональності якого обґрунтовані з урахуванням його спільного застосування з перспективним БпАК та саме БпАК поля бою [18].

Отримані результати віртуальних експериментів на розробленій стохастичній моделі для трьох варіантів ОС представлені в табл. 4 та на рис. 4. Аналіз представлених на рис. 7 результатів віртуальних експериментів для порівняння ефективності ОС трьох варіантів її створення показує:

1. Створення охоронної системи у складі існуючих (застарілих) комплексів (варіант №1) не доцільно, оскільки перспективні значення показника ефективності

«Ймовірність того, що завдання ОС виконано» не перевищують 0,2, що унеможливило практичне застосування ОС для охорони об'єктів критичної інфраструктури.

2. Створення охоронної системи у складі існуючих сучасних комплексів, які є на озброєнні провідних у технічному відношенні країн світу (варіант №2), є прийнятним, оскільки сума значень показників ефективності «Ймовірність того, що завдання ОС виконано» та «Ймовірність того, що завдання ОС виконано частково» досягає 0,6. Разом з тим, на практичне застосування такої системи буде суттєво впливати значення показника «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано», що становить до 0,4.

3. Проектування перспективної охоронної системи (варіант 3) із значеннями показників функціональності її складових, представленими в табл. 4, дозволяє досягти значень показників ефективності системи в цілому прийнятних для її практичного застосування як охоронної системи об'єктів критичної інфраструктури. Розраховане значення показника ефективності такої системи «Ймовірність того, що завдання ОС не виконано» не перевищує 0,2.

Таблиця 4 – Вхідні дані та результати віртуальних експериментів на розробленій стохастичній моделі функціональної поведінки охоронних систем під час перетину порушником трьох зон контролю

Варіант ОС	Значення показників функціональності складових ОС						Значення показників ефективності ОС			
	КОС		БпАК				$P_{t.ex}$	$P_{u.c}$	$P_{t.ex.p}$	$P_{t.n.ex}$
	$P_{det1}$	$P_{id1}$	$P_{det2}$	$P_{id2}$	$P_{dec}$	$P_{d.c}$				
Варіант №1	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,173	0,044	0,126	0,657
Варіант №2	0,85	0,75	0,8	0,9	0,8	0,95	0,395	0,025	0,157	0,422
Варіант №3	0,95	0,9	0,9	0,9	0,8	0,95	0,556	0,022	0,234	0,188

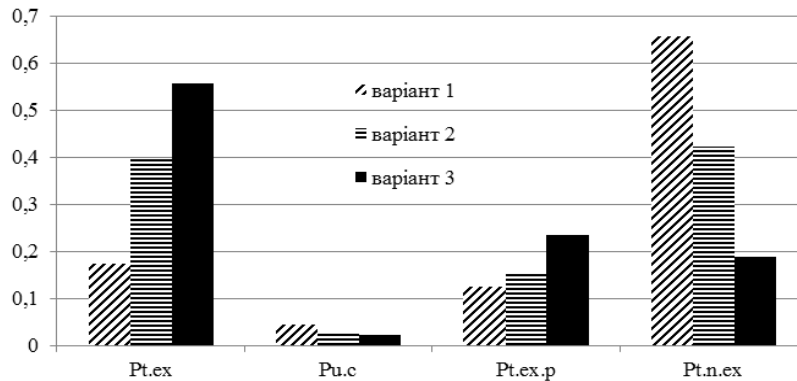


Рис. 4. Значення показників ефективності охоронної системи для визначених варіантів її реалізації  
(Fig. 4. The value of indicators of the effectiveness of the security system for certain options for its implementation)

## Висновки

Представлена в статті стохастична модель функціональної поведінки, що призначена для розв'язання задач функціонального синтезу охоронної системи у складі комплексу охоронної сигналізації та безпілотного авіаційного комплексу, є частиною інформаційної технології проектування охоронних систем об'єктів критичної інфраструктури. Модель відтворює реакції складових охоронної системи на послідовний перетин порушниками трьох зон контролю під час виконання завдань з охорони об'єктів критичної інфраструктури. Реакції комплексу охоронної сигналізації відтворюють перетин порушниками встановлених дальньої та ближньої зон контролю. Реакції безпілотного авіаційного комплексу є

продовженням реакцій комплексу охоронної сигналізації та відтворюють виявлення і супроводження порушників у розрахованій третій зоні контролю.

Оснащення служб охоронною системою нового зразка забезпечить економію сил і засобів, що необхідні при виконанні завдань з охорони об'єктів критичної інфраструктури. Така охоронна система може бути використана для цілевказання іншим силам і засобам охорони, які мають більш широкі можливості; для забезпечення охорони військових і важливих цивільних об'єктів від терористичних та кримінальних атак, проведення диверсій.

Напрямок подальших досліджень є удосконалення надійніших моделей авіоники БпАК та його складових з урахуванням застосування комплексу в складі перспективної охоронної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Garcia M. L. Design and evaluation of physical protection systems / M. L. Garcia. – USA: Sandia Corporation, 2007, 337 p.
- Unmanned systems integrated roadmap 2017–2042 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post\\_attachment/206477.pdf](https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post_attachment/206477.pdf).
- DeGarmo M. Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace / M. DeGarmo. – Virginia : Center for Advanced Aviation System Development McLean, 2004. – 92 p.
- Sleeve G.E. The application of unattended ground sensors to stationary targets, in peace and wartime applications and technical issues for unattended ground sensors / G.E. Sleeve, S. Peglow, R. Hamrick // SPIE. – 1997. – Vol. 3081. – P. 21–29.
- Мосалев В. Системы наблюдения за полем боя на базе разведывательно-сигнализационных приборов / В. Мосалев // Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 2. – С. 21–27.
- Andrushchenko V. Analysis of modern capabilities and perspectives of the technology for seismoacoustic identification of intruder of the protected object perimeter / Andrushchenko V., Syrotenko P., Bugrii V. – Kyiv: T.G. Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine, 2015 – P. 6–12.
- Eyes of the Army. The Army Roadmap for UAS 2010–2035. Army UAS CoE Staff. U. S. Army, 2010. – 140 p.
- Пащук Ю. М. Тактичні безпілотні авіаційні комплекси: можливості та обмеження у застосуванні / Ю. М. Пащук, Ю. П. Сальник // Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України, 2015. – № 1(18). – С. 23–28.
- Харченко В. С. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: модели надежности / В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко та інш. // Ядерна та радіаційна безпека, 2017. – № 4 (76). – С. 50–54.
- Звежинский С. С. Классификации, особенности и информационно-измерительные модели средств обнаружения [Електронний ресурс] / С. С. Звежинский, В. А. Иванов, В. А. Рудниченко // Бюро научно-технической информации, 2008. Режим доступу: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=869&lvl=19.01.02>.

11. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 399 с.
12. Волочий Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочий. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2004. – 220 с.
13. Vollmerhausen R. H. The targeting task performance metric [Електронний ресурс] / R. H. Vollmerhausen, Ed. Jacobs. Technical report. AMSEL-NV-TR-230. Rev. 20, 2004. – 126 p. – Режим доступа: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA422493.xhtml>.
14. Волочий Б. Оцінка можливостей комплексу охоронної сигналізації з різною кількістю сейсмічних датчиків біля зони контролю / Б. Волочий, М. Змисний, В. Онищенко, та інші. // Дніпро : Системи та технології, 2019. – № 1(57). □ С. 47–67. – DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-1-57-4>.
15. Salnyk Yu. Stochastic model of the reaction the unattended ground sensor system based on {3+3} scheme / Yu. Salnyk, B. Volochiy, V. Onishchenko // Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29.2020. Paper ID 148. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235482>.
16. Salnyk Y. Mini-UAV flight and payload automated control system / Yu. Salnyk, Yu. Pashchuk, I. Matala // Львів: Військово-технічний збірник НАСВ, 2013. – № 2(9). – С. 90–94.
17. Freeman P. Actuation failure modes and effects analysis for a small UAV / P. Freeman, G. Balas // American Control Conference. USA, 2014. – P. 1292–1297. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859482>.
18. Беспилотные авиационные комплексы: методики сравнительной оценки боевых возможностей / М. М. Митрахович, В. И. Силков, А. В. Самков [и др.] под ред. В. И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 302 с.

## REFERENCES

1. Garcia, M.L. (2007), Design and evaluation of physical protection systems, Second Edition, Sandia Corporation, USA, 337 p.
2. (2017), *Unmanned systems integrated roadmap 2017–2042*, available at: [https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post\\_attachment/206477.pdf](https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post_attachment/206477.pdf).
3. De Garmo, M. (2004), *Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace*, Center for Advanced Aviation System Development McLean, Virginia, 92 p.
4. Sleaf, G.E., Peglow, S. & Hamrick R. (1997), “The application of unattended ground sensors to stationary targets, in peace and wartime applications and technical issues for unattended ground sensors”, *SPIE*, vol. 3081, pp. 21–29.
5. Mosalev, V. (2000), “Battlefield surveillance systems based on reconnaissance and alarm devices”, *ZVO*, No. 2, pp. 21–27.
6. Andrushchenko, V., Syrotenko, P. & Bugrii, V. (2015), *Analysis of modern capabilities and perspectives of the technology for seismoacoustic identification of intruder of the protected object perimeter*, KNU, Kyiv, Ukraine, pp. 6–12.
7. (2010), *Eyes of the Army. The Army Roadmap for UAS 2010-2035*, Army UAS CoE Staff, U. S. Army, 140 p.
8. Pashchuk, Ju.M. & Salnyk Ju.P. (2015), “Tactical unmanned aerial vehicles: opportunities and limitations in application”, *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(18), pp. 23–28.
9. Harchenko, V.S., Jastrebenckij, M.A. & Fesenko G.V. (2017), “NPP post-accident monitoring system using unmanned aerial vehicles: reliability models”, *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, No. 4 (76), pp. 50–54.
10. Zvezhinskij, S.S., Ivanov, V.A. & Rudnichenko, V.A. (2008), *Classifications, features and information-measuring models of detection tools*, Bjuro nauchno-tehnicheskoi informacii, available at: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=869&lvl=19.01.02>.
11. Buslenko N. P. (1978), *Complex systems Simulation*, Nauka, Moscow, 399 p.
12. Volochij, B. Ju. (2004), *Technology of information systems behavior algorithms modeling*, LP, Lviv, 220 p.
13. Vollmerhausen, R.H. & Jacobs, Ed.(2004), *The targeting task performance metric*, Technical report, AMSEL-NV-TR-230, Rev. 20, 126 p., available at: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA422493.xhtml>.
14. Volochij, B., Zmysnyj, M. & Onyshchenko, V. (2019), “Possibilities estimation of the security alarm system complex with various quantity of seismic sensors near a control zone”, *Systemy ta tehnologii*, No.1(57), pp.47–67, DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2019-1-57-4>.
15. Salnyk Yu., Volochiy, B. & Onishchenko V. (2020), “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. Paper ID 148, DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235482>.
16. Salnyk Y., Pashchuk, Yu. & Matala, I. (2013), “Mini-UAV flight and payload automated control system”, *Military-technical collection*, NASV, No. 2(9), pp. 90–94.
17. Freeman, P. & Balas, G. (2014), “Actuation failure modes and effects analysis for a small UAV”, *American Control Conference*, USA, pp. 1292–1297, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859482>.
18. Mitrahovich, M.M., Silkov, V.I. & Samkov, A.V. (2012), *Unmanned aerial systems: methods of comparative assessment of combat capabilities*, CNII VVT VS Ukraine, Kyiv, 302 p.

Received (Надійшла) 08.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.02.2021

## ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Сальник Юрій Павлович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна;

**Yurii Salnyk** – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, doctoral student, Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv, Ukraine;

e-mail: [jurasalnik@ukr.net](mailto:jurasalnik@ukr.net); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0772-6811>.

**Волочий Богдан Юрійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювання, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна;

**Bohdan Volochiy** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Theoretical Radio Engineering and Radio Measurement Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;  
e-mail: [bovolochiy@ukr.net](mailto:bovolochiy@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5230-9921>.

### Стохастическая модель функционального поведения охранной системы объекта критической инфраструктуры

Ю. П. Сальник, Б. Ю. Волочий

**Аннотация. Актуальность.** Объекты критической инфраструктуры нуждаются в надежной охране. К системам охраны таких объектов предъявляются специфические требования. Выполнение части этих требований может обеспечивать комплекс охранной сигнализации, в котором используются сигнализационные системы с сейсмическими датчиками. Вторую часть требований может выполнить беспилотный авиационный комплекс. Поэтому практическая целесообразность видится в сочетании этих двух комплексов в одной охранной системе с тремя зонами контроля. Первую (дальнюю) и вторую (ближнюю) зоны контроля обслуживает комплекс охранной сигнализации. Третья зона контроля (зона сопровождения нарушителя) назначается на основе данных от комплекса охранной сигнализации о типе нарушителя, его скорости и направлении движения. Беспилотный авиационный комплекс применяют для выполнения задания охранной системой в зоне сопровождения нарушителя по команде от комплекса охранной сигнализации. Для реализации такой охранной системы надо знать ответы на два вопроса. Первый, какое значение показателя эффективности охранной системы обеспечит сочетание существующих комплексов с их показателями функциональности. И второй, какими должны быть требования к показателям функциональности этих комплексов, чтобы охранная система обеспечивала необходимое значение показателя эффективности. Поэтому целью статьи является показать потенциальное значение показателя эффективности охранной системы, сформированной из существующих комплексов, а также оценить возможности повышения ее эффективности. **Метод.** Достичь поставленной цели позволяет стохастическая модель функционального поведения, которая должна воспроизводить все варианты реакции составляющих охранной системы на пересечение нарушителями трех зон контроля. **Результаты.** Основным результатом является дискретно-непрерывная стохастическая модель функционального поведения охранной системы объекта критической инфраструктуры в виде системы из 76 дифференциальных уравнений Колмогорова – Чепмена. Степень адекватности стохастической модели позволяет, кроме задачи анализа эффективности охранной системы, решать задачу синтеза показателей функциональности составляющих комплексов, которые объединены в охранную систему. **Выводы.** Проведенные исследования показали, что для объектов критической инфраструктуры создавать охранную систему на основе существующих комплексов охранной сигнализации и беспилотных авиационных комплексов нецелесообразно из-за того, что она будет иметь недопустимо низкую эффективность. На основе решения задачи синтеза представлены значения показателей функциональности составляющих каждого комплекса, в частности те, которые обеспечат необходимое значение показателя эффективности охранной системы. Стохастическая модель функционального поведения охранной системы может быть использована в информационной технологии ее проектирования для поиска компромиссных решений между различными вариантами состава, структуры и функционального поведения охранной системы.

**Ключевые слова:** стохастическая модель; эффективность системы; функциональное поведение системы; сигнализационная система с сейсмическим датчиком; комплекс охранной сигнализации; беспилотный авиационный комплекс, охранная система.

### A stochastic model of the security system's functional behavior for a critical infrastructure object

Yurii Salnyk, Bohdan Volochiy

**Abstract. Context.** Objects of critical infrastructure require adequate security. The security systems for such objects have a specific requirements. Fulfilment of part of these requirements can provide by an unattended ground sensor complex which uses seismic sensors. The second part of the requirements can be performed by an unmanned aircraft complex. Therefore, it is seen as practical feasibility to combine these two complexes in one security system with three control zones. The first (Further) and second (Hither) control zones are served by an unattended ground sensor complex. The third control zone (intruder escort zone) is assigned on the data from the unattended ground sensor complex: the type of intruder, his speed and direction of movement. The unmanned aircraft complex is used to perform a security system task in the intruder's tracking area on command from the unattended ground sensor complex. You need to know two question answers to implement such a security system. First, what is the efficiency indicator value of the security system will ensure the combination of the existing complexes with their functionality indicators. And the second, what should be the functionality indicators requirements of these complexes in order for the security system to provide the required performance indicator value. **Objective.** Therefore, the goal of the article is to show the potential value of the efficiency index of the security system formed from the existing complexes, as well as to assess the possibility of increasing its efficiency. **Methods.** This goal is achieved by the stochastic model of functional behavior, which should reproduce all variants of the security system components reaction to the crossing of three control zones by intruders. **Results.** The main result is a discrete-continuous stochastic model of the functional behavior of the critical infrastructure object security system in the form of 76 Kolmogorov-Chapman differential equations system. The grade of the stochastic model adequacy makes it possible, in addition to the analysis tasks of the security system effectiveness, to solve the synthesis tasks of functionality indicators of the complex components that are integrated into the security system. **Conclusions.** Research was conducted have shown that it is impractical to create a security system based on existing unattended ground sensor complexes and unmanned aircraft systems for critical infrastructure objects because of the unacceptably low system efficiency. Based on the synthesis task solution, the functionality indicators values of the each complex components, in particular those that will provide the required value of the security system efficiency indicator, are presented. The stochastic model of the functional behavior of the security system can be used in the information technology of its design to find compromise solutions between different variants of composition, structure and functional behavior of the security system.

**Keywords:** stochastic model; system efficiency; system functional behavior; unattended ground sensor complex with seismic sensor; unmanned aircraft complex; security system.