



ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНА СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНІСНОЇ ПОВЕДІНКИ КОМПЛЕКСУ ОХОРОННОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ

Б. Волочій, П. Чернишук¹, Ю. Сальник, В. Онищенко²

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, 79013, Україна

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

(Подано 16 листопада 2022)

Для довготривалої експлуатації комплексу охоронної сигналізації об'єкта критичної інфраструктури важливим є технічне обслуговування сигналізаційних систем із сейсмічними давачами, встановлених на контрольованих ділянках його периметра. Задача формування стратегії технічного обслуговування потребує достовірних даних про необхідну кількість резервних сигналізаційних систем на задану тривалість експлуатації та допустиме значення тривалості процесу заміни несправної сигналізаційної системи. В статті показана стохастична модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації з встановленням п'яти сигналізаційних систем з сейсмодавачами на контрольованій ділянці периметра. Конфігурація з п'яти сигналізаційних систем із сейсмодавачами, встановлених на контрольованих ділянках периметра, забезпечує використання мажоритарного принципу з правилом {3 із 5} для прийняття рішення про тип порушника. Разом із цим, мажоритарний принцип забезпечує ефективний спосіб виявлення непрацездатної сигналізаційної системи з сейсмодавачами, що є важливим для технічного обслуговування комплексу охоронної сигналізації. Така модель необхідна для вибору доцільного варіанта стратегії технічного обслуговування комплексу охоронної сигналізації, яка забезпечить задане значення показника його надійності на час довготривалої експлуатації.

Ключові слова: сигналізаційна система з сейсмодавачем, старіння сигналізаційних систем, експлуатаційна поведінка, відмовостійка система мажоритарного типу, стохастична модель експлуатаційної поведінки.

УДК 621.391

1. Вступ

В наш час безпеці об'єктів критичної інфраструктури приділяється підвищена увага. У публікаціях ми бачимо багато різних варіантів організації систем безпеки з використанням різноманітних давачів та інших технічних засобів. Проте у більшості виявлених публікацій розглядається лише функціональний аспект роботи комплексу охоронної сигналізації без урахування показників їхньої надійності.

У статті показана дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації (КОС) з використанням п'яти сигналізаційних

систем із сейсмодавачами на контрольованій ділянці периметра. Конфігурація з п'яти сигналізаційних систем з сейсмодавачами, встановлених на контрольованій ділянці периметра, передбачає (забезпечує) використання для прийняття рішення про тип порушника мажоритарного принципу з правилом прийняття рішення $\{3 \text{ із } 5\}$ [2]. Разом із цим мажоритарний принцип у поєднанні з відповідним технічним обслуговуванням забезпечує високий рівень надійності та ефективний спосіб виявлення непрацездатної сигналізаційної системи на контрольованій ділянці периметра. Така модель необхідна для вибору доцільного варіанта стратегії технічного обслуговування КОС, яка забезпечить задане значення показника його надійності на довготривалу експлуатацію. Розроблення стохастичної моделі здійснено за технологією аналітичного моделювання, поданою в [3, 4].

Для підтримання працездатності КОС при довготривалій експлуатації необхідним є своєчасне виявлення і заміна несправних сигналізаційних систем та наявність необхідної кількості резервних сигналізаційних систем. Мажоритарний принцип дає змогу сформулювати повідомлення для служби охорони про наявність сигналізаційної системи, яка втратила працездатність, з вказанням місця її розташування. Це важливо для виконання своєчасної заміни несправної сигналізаційної системи.

2. Відомі результати досліджень комплексів охоронної сигналізації з використанням сейсмодавачів

2.1. Особливості комплексів охоронної сигналізації з використанням сейсмодавачів

Охорона об'єктів критичної інфраструктури є завданням, що здійснюється службою охорони. З метою підвищення рівня захищеності об'єкта, що охороняється, доцільним є використання КОС. Такий комплекс має відповідати сучасним вимогам до надійності охорони за мінімальною кількістю обслуговуючого персоналу, економічності та простоти експлуатації [5]. Таким вимогам відповідає КОС з сейсмічними сигналізаційними системами.

Одним із ефективних напрямів покращення охорони військових об'єктів є запровадження нових, більш досконалих технічних засобів охорони, вдосконалення форм та методів організації несення служби з їх експлуатації. Сьогодні жодний засіб охорони, який використовується в охороні військових об'єктів, не може вважатися абсолютно ефективним. Складна електромагнітна обстановка на охоронному об'єкті суттєво обмежує застосування систем виявлення. В статті [6] розглядається засіб охорони, який міг би функціонувати у несприятливому електромагнітному середовищі, не будучи розпізнаним злоумисниками. А місце встановлення і принцип роботи є незрозумілим навіть співробітникам, що працюють на об'єкті. Сьогодні ефективним варіантом вирішення цієї проблеми, на думку авторів статті, є розроблення та запровадження технічного засобу виявлення, принцип дії якого заснований на оптичних ефектах в закритому просторі (наприклад, в оптоволоконі). Ще одним цікавим варіантом представляється застосування сейсмічного давача виявлення в системі охорони військового об'єкта.

В статтях [7, 8] автори звертають увагу на те, що сейсмоакустичні системи вимагають кваліфікованого монтажу і тривалого настроювання в умовах території, яка підлягає охороні. У тому числі: запису корисних сигналів у базу даних для формування сейсмічного образу порушника; дослідження ділянки охорони на предмет виявлення підземних комунікацій та ліній зв'язку та занесення їх сейсмосигналів у базу даних фонового сейсмічного шуму. Однак, подальша експлуатація і багаторічна живучість сейсмоакустичних систем дозволяє багаторазово компенсувати понесені витрати.

З проаналізованих згаданих і незгаданих публікацій про особливості комплексів охоронної сигналізації можна зробити висновок, що сейсмічні давачі набули широкого поширення у практиці проектування охоронних систем. До основних переваг сейсмічних давачів можна зарахувати пасивний принцип роботи, можливість довготривалої експлуатації, а також приховане встановлення. Цей тип давачів має високу ступінь стійкості до несприятливих погодних умов, низький рівень енергоспоживання та порівняно з іншими видами давачів відносно низький рівень хибних спрацювань.

2.2. Дослідження ефективності комплексів охоронної сигналізації з сейсмічними давачами

Застосування КОС оснащених сигналізаційними системами з сейсмічними давачами обмежується недостатньою достовірністю розпізнавання типу порушника за відомими методами. Ймовірність правильного визначення типу порушника для відомих методів не перевищує 0,85. Крім того, такі КОС не забезпечують отримання координат порушника в масштабі реального часу (крім тих випадків, коли створюється розгалужена мережа сигналізаційних систем). В статті [2] запропоновано метод підвищення достовірності розпізнавання типу порушника з використанням трьох контрольованих зон та стохастичну модель експлуатаційної функціональної поведінки КОС для дослідження ефективності цього методу.

Стохастична модель реакції КОС на перетин рухомим об'єктом дальньої та ближньої зон контролю при попарному розміщенні сейсмічних давачів у описана в статті [9]. Запропонована модель дозволяє проводити дослідження залежності ефективності КОС від чутливості сейсмічних давачів, ефективності методу класифікації рухомого об'єкта та від ефективності системи передавання радіосигналів. Модель має необхідний рівень адекватності, та дозволяє обмежити кількість і обсяг натуральних випробувань роботи КОС. При цьому отримати достовірні результати щодо ефективності і надійності його роботи та визначити вимоги до методу класифікації рухомих об'єктів і до системи передавання радіосигналу за умови заданої чутливості сейсмодавача з урахуванням типу ґрунту, рельєфу місцевості, віддалення РО від сейсмодавача, ваги та швидкості рухомого об'єкта.

Стохастична модель процесу взаємодії розвідувально-сигналізаційного комплексу з об'єктом виявлення, яку розроблено з використанням технології аналітичного моделювання дискретно-неперервних стохастичних систем, представлена в статті [10]. В розробленій моделі враховано особливості місцевості (тип ґрунту, рельєф), пори року, розташування об'єкту, що охороняється, та наявність радіозабуд. Розроблена модель дозволяє обмежити обсяг натурних випробувань розвідувально-сигналізаційного комплексу і при цьому отримати достовірні значення показників його ефективності.

Використання математичних та географічних методів інформаційних систем для проєктування систем контролю охоронних периметрів показано в статті [11]. Запропоновані методи дозволяють спроектувати систему з оптимальними показниками ефективності з урахуванням кліматичних умов та умов навколишнього середовища.

Розроблення алгоритму оцінки ризиків, пов'язаних із забезпеченням безпеки об'єктів критичної інфраструктури, таких, як атомні електростанції, склади озброєння, місця зберігання вибухових та пожежонебезпечних речовин, описано в статті [12]. Розроблений алгоритм дозволяє оцінити ймовірності проникнення на територію об'єкта, що охороняється, з урахуванням забуд та охоронних систем, розташованих на його території. Оскільки тестування та валідація охоронних систем в реальних умовах можливі лише в обмеженій мірі. Комп'ютерна техніка дозволяє проводити моделювання різних видів спроб проникнення на територію захищеної області і так виявляти приховані вразливості системи безпеки. А ретельно розроблена модель реального досліджуваного середовища дозволить максимально наблизити отримані результати до реальності.

Дослідження показників ефективності систем охорони периметрів широко представлені у наукових публікаціях, як для сигналізаційних систем на основі сейсмічних давачів, так і на основі інших типів сенсорів. Проте забезпечення надійності таких систем під час довготривалої експлуатації не розглядається.

В комплексі охоронної сигналізації, що розглядається в цій статті, для забезпечення достовірного розпізнавання типу порушника використовується мажоритарний принцип прийняття рішення за правилом {3 із 5}. Відповідно на контрольованих ділянках периметра передбачено встановлення по 5 сигналізаційних систем з сейсмодавачами. Зазначимо, що мажоритарний принцип разом із підвищенням достовірності розпізнавання, забезпечує підвищення надійності КОС за рахунок влас-

тивості відмовостійкості. Тому з погляду надійності кожний фрагмент КОС можна розглядати як відмовостійку систему мажоритарного типу. Однак відомо, що відмовостійка система мажоритарного типу забезпечує підвищення надійності за показником “ймовірність безвідмовної роботи” за відносно невеликих тривалостей неперервної експлуатації.

Метою наступного огляду наукових публікацій є пошук досліджень з розглядом методів підвищення надійності відмовостійких систем мажоритарного типу при неперервній довготривалій експлуатації.

2.3. Відомі моделі експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем мажоритарного типу

Питання моделювання експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійких систем мажоритарного типу досить широко представлено у наукових публікаціях. В ході проведення аналізу вітчизняних та зарубіжних наукових публікацій було виявлено велику кількість статей, присвячених цьому питанню.

Стохастичну модель експлуатаційної надійнісної поведінки відмовостійкої системи мажоритарного типу з правилом прийняття рішення {3 із 5} з можливістю реконфігурації ядра та переходу до правила {2 із 3} показано в статті [13]. Після відмови двох модулів в ядрі і переходу до правила прийняття рішення {2 із 3}, можлива реконфігурація продовження роботи системи до моменту відмови останнього модуля. Результати моделювання показали, що використання відмовостійкої системи з реконфігурацією мажоритарної структури дає суттєве підвищення її надійності, порівняно з аналогічною відмовостійкою системою без реконфігурації.

Модель експлуатаційної поведінки відмовостійких систем мажоритарного типу з правилом {3 із 5} у вигляді графа станів і переходів представлено в статті [14]. В моделі враховано ненадійну роботу засобів контролю та діагностики, засобів комутації, а також ймовірність неуспішного ремонту модулів ядра. На основі графа сформовано математичну модель у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка може практично використовуватись для розв’язання задачі надійнісного аналізу.

Порівняльне дослідження трьох конфігурацій відмовостійкої системи мажоритарного типу подано в статті [15]. Розглянуті мажоритарна структура з вкладеними всередину трьома мажоритарними структурами, мажоритарна структура з фіксованим правилом прийняття рішення та мажоритарна структура з можливістю зміни правила прийняття рішень та відповідної реконфігурації ядра. Розроблені моделі відмовостійких систем призначені для розв’язання задач надійнісного проектування радіоелектронних засобів довготривалої експлуатації. Однак, залежно від умов експлуатації радіоелектронних засобів, для підвищення достовірності визначених показників надійності, актуальною задачею є розроблення моделей з урахуванням ефекту їх старіння.

Розроблення двох надійнісних аналітичних моделей відмовостійкої системи з дворівневим принципом мажоритарного голосування показано в статті [16]. Удосконалена надійнісна аналітична модель обслуговуваної відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури з ковзним резервуванням та фіксованим правилом прийняття рішення дозволяє розв’язувати задачі багатоваріантного аналізу (обумовлені різними варіантами реалізації алгоритму використання резерву та стратегії аварійного відновлення). Ця модель дозволяє вирішувати задачі надійнісного параметричного синтезу шляхом знаходження компромісних рішень при виборі параметрів відмовостійкої РЕС і проводити порівняльні дослідження їхньої надійності.

Метод підвищення ступеня адекватності моделі надійнісної поведінки відмовостійкої системи з мажоритарною структурою з урахуванням старіння модулів ядра, яке може відбуватися з різною швидкістю, представлено у статті [17]. Метод базується на гіпотезі про те, що перша відмова модуля в ядрі мажоритарної структури сигналізує про близькість вичерпання експлуатаційного ресурсу і в інших модулів ядра. Тому вважати, що після заміни несправного модуля резервним інші модулі ядра мають початковий ресурс працездатності, є неправильним. З використанням запропонованого методу розроблено надійнісну модель відмовостійкої системи {2 із 3} з ковзним резервуванням

модулів ядра та з урахуванням залежності інтенсивності їхніх відмов від тривалості експлуатації. Проведені за допомогою моделі порівняльні дослідження показали суттєву різницю між значеннями показника надійності, визначеного без урахування і з урахуванням спрацьованого експлуатаційного ресурсу модулів ядра після заміни несправного модуля резервним.

Не зважаючи на широке використання відмовостійких систем мажоритарного типу [18, 19], серед відомих стохастичних моделей експлуатаційної поведінки для відмовостійкої системи з правилом прийняття рішення {3 із 5} немає моделі для розв'язання поставленої задачі. Тому задача розроблення стохастичної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки залишається актуальною. Ступінь адекватності розробленої стохастичної моделі має забезпечувати розв'язання задач надійнісного синтезу показників та параметрів складових відмовостійкої системи з високим рівнем достовірності.

Отже, на основі проведеного аналізу публікацій зроблено висновок про те, що для розв'язання поставленої задачі підтримання надійності фрагмента комплексу охоронної сигналізації службою охорони актуальним є розроблення стохастичної моделі експлуатаційної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації, в якій враховано: мажоритарний принцип прийняття рішень з правилом голосування {3 із 5}; показник надійності сигналізаційної системи з сейсмічним давачем (ССЗСД) “інтенсивність відмов”; швидкість старіння ССЗСД, встановлених на контрольованій ділянці периметра; можливість одночасної заміни двох несправних ССЗСД; обмеження на кількість резервних ССЗСД у служби охорони об'єкта критичної інфраструктури для заданої тривалості неперервної експлуатації комплексу охоронної сигналізації; обмеження на мінімальну і максимальну тривалості процесу заміни несправної ССЗСД.

3. Вербальна модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації

Структура фрагмента комплексу охоронної сигналізації відповідає використанню для прийняття рішень про наявність і тип порушника, що перетинає контрольовану ділянку периметра, мажоритарний принцип з правилом голосування {3 із 5}. Разом із цим, ця структура відповідає відмовостійкій системі мажоритарного типу з правилом голосування {3 із 5}.

Об'єктом дослідження у цій роботі є експлуатаційна надійнісна поведінка частини (фрагмента) комплексу охоронної сигналізації (КОС) при багатократному перетині порушниками контрольованої зони охорони периметра. До складу фрагмента КОС входять 5 сигналізаційних систем з сейсмодавачами, для реалізації мажоритарного принципу з правилом прийняття рішення {3 із 5}. Використання мажоритарного принципу для визначення типу рухомого об'єкта, що перетинає контрольовану зону, дозволяє підвищити значення показника ефективності системи “ P_{id} ”. Підвищення ступеня адекватності моделі забезпечено врахуванням ефекту старіння сигналізаційних систем під час тривалої експлуатації. Врахування ефекту старіння є особливо актуальним для КОС, оскільки сигналізаційні системи знаходяться тривалий час (до 10 років) у агресивному середовищі.

Предмет дослідження (проектування) – це стратегія технічного обслуговування КОС, яка має забезпечити заданий рівень його надійності. Для стратегії технічного обслуговування КОС треба визначити:

- а) мінімальну кількість резервних систем для заданої тривалості експлуатації;
- б) допустиме (максимальне) значення тривалості процесу заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці.

За рахунок використання мажоритарного принципу прийняття рішення про тип виявленого рухомого об'єкта КОС має (отримує) властивість відмовостійкості. Тобто, він зберігає працездатність за наявності двох несправних ССЗСД на кожній контрольованій ділянці. Прийнято, що комплекс вважається працездатним, якщо він правильно визначає тип рухомого об'єкта. Для забезпечення працездатності КОС необхідно, щоб були працездатними у кожен момент часу не менше

трьох ССЗСД. У випадку, коли на контрольованій ділянці залишається менше трьох сигналізаційних систем, КОС вважається непрацездатним.

Для підтримки працездатності КОС при довготривалій експлуатації на об'єкті, що охороняється, передбачено резерв сигналізаційних систем. У випадку виходу з ладу ССЗСД, які встановлені на контрольованій ділянці, резервні сигналізаційні системи будуть використані для їх заміни та подовження терміну експлуатації КОС. За резерв та контроль працездатності ССЗСД на контрольованій ділянці периметра відповідає служба охорони об'єкта критичної інфраструктури, яка у випадку втрати працездатності ССЗСД повинна своєчасно, у встановлений регламентом термін, провести її заміну.

Працездатною вважається та ССЗСД, яка після появи рухомого об'єкта на контрольованій ділянці периметра передає сигнал про його виявлення та тип до системи приймання і відображення інформації. В системі приймання і відображення інформації цей сигнал подається на мажоритарний елемент. Мажоритарний елемент після отримання сигналів з повідомленнями про тип рухомого об'єкта від п'ятих ССЗСД приймає остаточне рішення про тип рухомого об'єкта і передає його в службу охорони. Керуючись отриманою інформацією, служба охорони приймає рішення про свої подальші дії.

Непрацездатною вважається та ССЗСД, яка у випадку перетину рухомих об'єктом контрольованої ділянки периметра не передала сигнал до системи приймання та відображення інформації. Якщо система приймання і відображення інформації отримує повідомлення з контрольованої ділянки від інших сигналізаційних систем, то вона передає повідомлення про наявність несправної сигналізаційної системи у службу охорони.

Перелік показників надійності ССЗСД, які мають бути закладені в стохастичну модель: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ – відповідно перший, другий, третій, четвертий і п'ятий рівні підвищення інтенсивності відмов ССЗСД, встановлених на контрольованій ділянці периметра охорони. Зауважимо, що значення цих показників надійності характеризують швидкість старіння ССЗСД.

Дамо пояснення щодо п'яти рівнів інтенсивності відмов ССЗСД. При введенні КОС в експлуатацію всі сигналізаційні системи починають роботу одночасно, в результаті чого з часом їх експлуатаційний ресурс вичерпується. Перша відмова сигналізаційної системи свідчить про те, що її експлуатаційний ресурс вичерпано і через невеликий проміжок часу треба очікувати відмов решти сигналізаційних систем. Тому потрібно врахувати у моделі зростання інтенсивності відмов тих сигналізаційних систем, що продовжують свою роботу. Врахування цього ефекту представлено в моделі так: від початку експлуатації КОС до відмови першої ССЗСД інтенсивність відмов усіх ССЗСД дорівнює λ_1 . Після відмови першої ССЗСД значення інтенсивності відмов чотирьох систем, що продовжують роботу, зростає, та в моделі приймають значення λ_2 . Після відмови одної із п'яти ССЗСД на її місце на контрольованій ділянці через відрізок часу T_{zc} , що відповідає тривалості заміни несправної сигналізаційної системи, встановлюється нова система з резерву. Тому інтенсивність відмов для неї отримує значення λ_1 . Після відмови другої сигналізаційної системи інтенсивність відмов решти систем, що продовжують роботу від початку експлуатації КОС, отримують значення λ_3 . Відповідно на місце ССЗСД, яка втратила працездатність, буде встановлено сигналізаційну систему з резерву. Інтенсивність відмов для встановленої сигналізаційної системи відповідає інтенсивності відмов першого рівня λ_1 . Після відмови третьої сигналізаційної системи інтенсивність відмов двох ССЗСД, що працюють з початку експлуатації, приймає значення λ_4 , яке відповідає інтенсивності відмов четвертого рівня. Після відмови четвертої ССЗСД, що працює з початку експлуатації, значення інтенсивності відмов останньої системи набуде значення λ_5 . Після відмови останньої ССЗСД, що працює з початку експлуатації у поточній конфігурації залишаться лише сигналізаційні

системи, які були підключені з резерву. Інтенсивність відмов цих ССЗСД відповідає значенню інтенсивності відмов першого рівня, тобто λ_1 . Для встановлених з резерву ССЗСД ефект старіння враховується аналогічно до описаного вище.

Події описаної експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Події експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації

№	Подія “початок” інтервалу часу між сусідніми подіями	Подія “закінчення” інтервалу часу між сусідніми подіями	Середнє значення інтервалів часу між сусідніми подіями
1	Початок роботи п’яти ССЗСД, встановлених на контрольованій ділянці периметра охорони.	Відмова першої ССЗСД з п’яти ССЗСД, встановлених на контрольованій ділянці периметра охорони.	$T_1 = 1/\lambda_1$
2	Початок роботи чотирьох ССЗСД з першої п’ятірки, що залишилися на контрольованій ділянці периметра охорони після відмови першої ССЗСД.	Відмова другої ССЗСД з чотирьох ССЗСД, встановлених у першій п’ятірці на контрольованій ділянці периметра охорони.	$T_2 = 1/\lambda_2$
3	Початок роботи трьох ССЗСД з першої п’ятірки, що залишилися на контрольованій ділянці периметра охорони після відмови другої ССЗСД.	Відмова третьої ССЗСД з трьох ССЗСД, встановлених у першій п’ятірці на контрольованій ділянці периметра охорони.	$T_3 = 1/\lambda_3$
4	Початок роботи двох ССЗСД з першої п’ятірки, що залишилися на контрольованій ділянці периметра охорони після відмови третьої ССЗСД.	Відмова четвертої ССЗСД з двох ССЗСД, встановлених у першій п’ятірці на контрольованій ділянці периметра охорони.	$T_4 = 1/\lambda_4$
5	Початок роботи останньої ССЗСД з першої п’ятірки, що залишилася на контрольованій ділянці периметра охорони після відмови четвертої ССЗСД.	Відмова п’ятої останньої ССЗСД з встановлених у першій п’ятірці на контрольованій ділянці периметра охорони.	$T_5 = 1/\lambda_5$
6	Початок роботи першої резервної ССЗСД, встановленої на контрольованій ділянці периметра охорони замість несправної ССЗСД, яка втратила працездатність першою.	Відмова першої, встановленої на контрольованій ділянці замість несправної ССЗСД, резервної ССЗСД.	$T_1 = 1/\lambda_1$
...			
Таблиця має продовження залежно від кількості резервних ССЗСД			
77	Початок процесу заміни несправної ССЗСД.	Закінчення процесу заміни несправної ССЗСД.	$T_{3c} = 1/\lambda_{3c}$

В стохастичній моделі для представлення стратегії технічного обслуговування КОС необхідно врахувати, що:

1) процедура (процес) заміни несправної ССЗСД передбачає заміну всіх наявних на поточний момент непрацездатних систем, за умови наявності відповідної кількості сигналізаційних систем у резерві;

2) у тривалість процедури (процесу) заміни несправної ССЗСД, крім тривалості роботи з вилучення несправної ССЗСД і встановлення резервної, включено: інтервал часу від моменту появи

несправної ССЗСД до моменту отримання службою ремонту повідомлення про її виявлення; час підготовки (очікування можливості для проведення заміни).

Зазначимо, що інтервал часу від моменту появи несправної ССЗСД до моменту її виявлення характеризує (визначає) метод її виявлення. Також необхідно врахувати, що за час від моменту появи несправної ССЗСД до моменту появи можливості для проведення (виконання) роботи з її заміни можлива втрата працездатності ще одної ССЗСД.

Умови експлуатації сигналізаційних систем вказують на те, що без урахування в стохастичній моделі ефекту старіння ССЗСД достовірність результатів буде невисокою. Необхідність урахування ефекту старіння радіоелектронних систем, спричинена умовами їхньої експлуатації, показана в публікаціях [20, 21]. Для урахування в стохастичній моделі експлуатаційної функціональної поведінки КОС старіння ССЗСД за час роботи на контрольованій ділянці використано спосіб, описаний в статтях [17, 22, 23].

Умова виникнення стану критичної відмови КОС. Станом критичної відмови у моделі вважається стан, коли КОС більше не здатен визначати тип рухомого об'єкта за мажоритарним принципом. Такий стан виникає, коли на контрольованій ділянці залишилося лише дві справних ССЗСД.

4. Розроблення дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації

Розроблення дискретно-неперервної стохастичної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації здійснюється за технологією, описаною в монографії [3]. Ця технологія забезпечила можливість здійснити розроблення універсального програмного модуля, який дає змогу проєктанту отримувати програмні стохастичні моделі експлуатаційної поведінки [21]. Для цього він має здійснити розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної поведінки об'єкта дослідження.

4.1. Розроблення опорного графа станів і переходів

Методикою розроблення структурно-автоматної моделі (САМ) об'єкта дослідження (експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента КОС) передбачено розроблення опорного графа станів і переходів [4]. Необхідну інформацію для цього дає представлена вище вербальна модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента КОС. Для розроблення опорного графа проєктованого КОС необхідно:

- а) призначити з відповідним обґрунтуванням компоненти вектора станів об'єкта дослідження;
- б) задати перелік параметрів та показників складових фрагмента КОС, які будуть представлені в САМ, а відтак – і в стохастичній моделі об'єкта дослідження;
- в) вибрати базові події експлуатаційної надійнісної поведінки об'єкта дослідження, які представляють всі процеси і процедури, що закладені в його надійнісну поведінку.

Зазначимо, що компоненти вектора станів, перелік параметрів та показників об'єкта дослідження, базові події експлуатаційної надійнісної поведінки задають рівень деталізації представлення об'єкта дослідження в стохастичній моделі і вносять вклад в забезпечення ступеня її адекватності, необхідного для проведення досліджень.

Компоненти вектора станів показують:

V1 – поточні значення кількості ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра з першим (початковим) рівнем інтенсивності відмов: початкове значення $V1 = 5$;

V2 – поточні значення кількості ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра з другим рівнем інтенсивності відмов: початкове значення $V2 = 0$;

V3 – поточні значення кількості ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра з третім рівнем інтенсивності відмов: початкове значення $V3 = 0$;

Таблиця 2

**Опорний граф станів для розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної надій-
нісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації**

№ к р о к у	Стан, що розгля- дається, і актуа- льна базова подія	Вектор станів							№ с т а н у	Перехід з стану в стан	Формула розра- хунку інтенсив- ності переходу
		Стани сигналізаційних сис- тем, встановлених на конт- рольованій ділянці					Управ- ління резервом				
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Початковий стан	5	0	0	0	0	5	0	1(1)	–	–
2	1БП1	0	4	0	0	0	5	1	2(2)	1→2	$p_{1-2} = \lambda_1$
<i>Пояснення до кроку 2:</i> В стані 1 втратила працездатність одна із п'яти ССЗСД. Компонента V7 вказує на те, що на контрольованій ділянці появилася несправна ССЗСД. Подія БП1 “повідомила” про те, що надалі для 4-х ССЗСД початкове значення показника надійності “середнє значення тривалостей безвідмовної роботи” зменшиться. Це означає, що ці чотири ССЗСД покидають перший (початковий) рівень інтенсивності відмов і отримають другий (вищий) рівень інтенсивності відмов. Таку зміну стану показують значення компонент V1 та V2. Тепер на контрольованій ділянці є 4 працездатних ССЗСД і одна ССЗСД несправна, яка “очікує” на заміну.											
3	2БП1	0	0	3	0	0	5	2	3(3)	2→3	$p_{2-3} = \lambda_2$
4	2БП2	1	4	0	0	0	4	0	4(4)	2→4	$p_{2-4} = 1/T_{3c}$
<i>Пояснення до кроку 4:</i> В стані 2 завершено процес заміни несправної ССЗСД на резервну ССЗСД. Про це “повідомляє” зміна значень компонент V1 та V6. Разом з цим компонента V1 “повідомляє”, що резервна ССЗСД працює з початковим значенням показника надійності “середнє значення тривалостей безвідмовної роботи”. Тобто з першим рівнем інтенсивності відмов. Відзначимо, що тепер несправної ССЗСД на контро- льованій ділянці немає. Про це “повідомляє” компонента V7.											
5	3БП1	0	0	0	2	0	5	3	KB1	3→KB1	$p_{3-KB} = \lambda_3$
<i>Пояснення до кроку 5:</i> В стані 3 втратила працездатність одна із трьох ССЗСД. Компонента V7 вказує на те, що на контрольованій ділянці появилася третя несправна ССЗСД. Відповідно тепер на контрольованій діля- нці залишилися 2 працездатні ССЗСД, що показує значення компоненти вектора V4. Сформований вектор стану отримує позначення KB1, яке вказує на те, що після відмови третьої ССЗСД комплекс охоронної сиг- налізації втрачає працездатність. Це обумовлено тим, що для прийняття рішення про тип порушника вико- ристовується мажоритарний принцип з правилом {3 із 5}. А так як на контрольованій ділянці залишилися дві працездатні ССЗСД, то такий фрагмент КОС вважається непрацездатним. Тобто фрагмент КОС перебу- ває в стані критичної відмови (KB).											
6	3БП2	2	0	3	0	0	3	0	5(5)	3→5	$p_{3-5} = 1/T_{3c}$
7	4БП1	1	0	3	0	0	4	1	6(6)	4→6	$p_{4-6} = \lambda_2$
8	5БП1	2	0	0	2	0	3	1	7(7)	5→7	$p_{5-7} = \lambda_3$
9	6БП1	1	0	0	2	0	4	2	8(8)	6→8	$p_{6-8} = \lambda_3$
10	6БП2	2	0	3	0	0	3	0	5(5)	6→5	$p_{6-5} = 1/T_{3c}$
11	7БП1	2	0	0	0	1	3	2	9(9)	7→9	$p_{7-9} = \lambda_4$
12	7БП2	3	0	0	2	0	2	0	10(10)	7→10	$p_{7-10} = 1/T_{3c}$
13	8БП1	1	0	0	0	1	4	3	KB2	8→KB2	$p_{8-KB} = \lambda_4$
14	8БП2	3	0	0	2	0	2	0	10(10)	8→10	$p_{8-10} = 1/T_{3c}$
15	9БП1	2	0	0	0	0	3	3	KB3	9→KB3	$p_{9-KB} = \lambda_5$
16	9БП2	4	0	0	0	1	1	0	11(11)	9→11	$p_{9-11} = 1/T_{3c}$
17	10БП1	3	0	0	0	1	2	1	12(12)	10→12	$p_{10-12} = \lambda_4$
18	11БП1	4	0	0	0	0	1	1	13(13)	11→13	$p_{11-13} = \lambda_5$
19	12БП1	3	0	0	0	0	2	2	14(14)	12→14	$p_{12-14} = \lambda_5$
20	12БП2	4	0	0	0	1	1	0	11(11)	12→11	$p_{12-11} = 1/T_{3c}$

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
21	13БП1	0	3	0	0	0	1	2	15(17)	13→15	$p_{13-15} = \lambda_1$
22	13БП2	5	0	0	0	0	0	0	16(15)	13→16	$p_{13-16} = 1/T_{zc}$
23	14БП1	0	2	0	0	0	2	3	KB4	14→KB4	$p_{14-KB} = \lambda_1$
24	14БП2	5	0	0	0	0	0	0	16(15)	14→16	$p_{14-16} = 1/T_{zc}$
25	15БП1	0	0	2	0	0	1	3	KB5	15→KB5	$p_{15-KB} = \lambda_2$
26	15БП2	1	3	0	0	0	0	1	17(19)	15→17	$p_{15-17} = 1/T_{zc}$
27	16БП1	0	4	0	0	0	0	1	18(16)	16→18	$p_{16-18} = \lambda_1$
28	17БП1	1	0	2	0	0	0	2	19(20)	17→19	$p_{17-19} = \lambda_2$
29	18БП1	0	0	3	0	0	0	2	20(18)	18→20	$p_{18-20} = \lambda_2$
30	19БП1	1	0	0	1	0	0	3	KB6	19→KB	$p_{19-KB} = \lambda_3$
31	20БП1	0	0	0	2	0	0	3	KB7	20→KB	$p_{20-KB} = \lambda_3$

Пояснення до табл. 2:

1) Нумерація станів має два числа – перше число відповідає номеру стану в опорному графі станів і переходів. А друге (в дужках) відповідає номеру стану графа, який присвоїла програмна стохастична модель. Співпадіння станів і переходів цих двох графів свідчить про безпомилкове розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента КОС.

2) В таблиці наведені пояснення до виконання 2-го, 4-го і 5-го кроків. На основі цих пояснень читач може зрозуміти як виконано формування векторів стану для решти кроків.

3) Відзначимо, що переходи із поточного стану в наступний стан відбуваються згідно базової події БП1 в момент закінчення інтервалу часу неперервної безвідмовної роботи ССЗСД в поточному стані. А для базової події БП2 – в момент закінчення інтервалу часу заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці. Зауважимо, для базових подій об'єкта дослідження, що розглядається в статті, немає альтернатив. Тому формули для визначення значень “інтенсивностей переходів із стану в стан”, які є параметрами графа станів, представлені в такому вигляді: $p_{12} = \lambda_1$; $p_{23} = \lambda_2$; і т. д. В цих формулах для інтенсивностей переходів використано позначення p_{ij} , у якого i – номер поточного стану, j – номер наступного стану. Послідовність значень інтенсивностей відмов $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ показує швидкість старіння ССЗСД, а в графі станів відображає “інтенсивність появи базових подій БП1 в об'єкті дослідження”.

V4 – поточні значення кількості ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра з четвертим рівнем інтенсивності відмов: початкове значення $V4 = 0$; V5 – поточні значення кількості ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра з п'ятим рівнем інтенсивності відмов: початкове значення $V5 = 0$;

V6 – поточні значення кількості резервних ССЗСД: початкове значення $V6 = 5$;

V7 – поточні значення кількості непрацездатних ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра (відображає перебіг процесу заміни несправної ССЗСД): початкове значення $V7 = 0$ – несправних ССЗСД на контрольованій ділянці немає; $V7 = 1$ – необхідна заміна однієї несправної ССЗСД, $V7 = 2$ – необхідна заміна двох ССЗСД;

Зазначимо, що зростання рівнів інтенсивності відмов відображають в стохастичній моделі ефект старіння ССЗСД в процесі експлуатації [19].

Параметри та показники складових фрагмента КОС:

T_{zc} – тривалість заміни несправної ССЗСД на резервну;

S – початкова кількість ССЗСД встановлених на контрольованій ділянці ($S = 5$);

R – початкова кількість резервних ССЗСД у служби охорони об'єкта ($R = 5$);

K – коефіцієнт швидкості старіння ССЗСД встановлених на контрольованій ділянці;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ – інтенсивності відмов ССЗСД, що відображають ефект їх старіння (описані вище).

Базові події експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента КОС:

Згідно технології стохастичного моделювання базовими подіями є всі події представлені в таблиці 1 в колонці ПОДІЯ – “закінчення” [3]. Базові події, що представляють відмови різних ССзСД, фактично для моделі є одною базовою подією “Відмова ССзСД, яка встановлена на контрольованій ділянці”. Для цієї базової події використано позначення БП1. Для базової події “закінчення процедури заміни несправної ССзСД” використано позначення БП2.

Після визначення базових подій, компонент вектора стану та задання початкових значень для параметрів проєктованого КОС можна перейти до розроблення моделі експлуатаційної надійнісної поведінки у вигляді опорного графа станів та переходів.

Методика розроблення опорного графа станів і переходів описана в статті [4]. Опорний граф станів і переходів, розроблений для таких значень параметрів $S = 5$ і $R = 5$, представлений в табл. 2. Цей граф показує, що для статистичного представлення процесу багатократного перетину контрольованої зони рухомими об'єктами (порушниками) для досліджуваного фрагмента КОС є актуальними є 21 стан та 30 переходів. При цьому 20 переходів є наслідком базової події БП1, а 10 – наслідком базової події БП2.

4.2. Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП1

До складу структурно-автоматної моделі об'єкта дослідження входять такі компоненти:

- 1) базові події;
- 2) логічні вирази, якими представлені ситуації, в яких відбуваються базові події;
- 3) формули для визначення параметрів графа станів – “інтенсивності переходів із стану в стан”;
- 4) правила модифікації компонент вектора станів;
- 5) умова виникнення критичної відмови (КВ).

Зазначимо, що компоненти 1, 3 і 5 вже визначені під час розроблення опорного графа станів і переходів. Для визначення компонент 2 і 3 вибираємо фрагменти опорного графа станів з табл. 2, які “показують” ситуації в яких відбуваються базові події. Вибір фрагментів здійснюється по черзі для кожної базової події. Кількість фрагментів для кожної базової події, а відповідно і кількість ситуацій для неї, визначається за кількістю кроків в табл. 2, на яких вона розглядається. У фрагмент включається запис двох кроків: запис кроку для базової події, що розглядається, та запис попереднього кроку, на якому визначено необхідний для розгляду вектор стану.

Вибрані з табл. 2 фрагменти опорного графа станів і переходів, зображені в табл. 3, “показують” 20 ситуацій, в яких відбувається базова подія БП1.

На основі даних табл. 3 визначаємо компоненти структурно-автоматної моделі для БП1. Для ситуації 1 логічний вираз опису ситуації складається на основі вектора стану 1, в якому відбувається (має місце) базова подія БП1. Цей вектор має такі значення компонент: 5000050. Тому формалізований опис ситуації 1 має такий вигляд:

$$(V1 = 5) \text{ AND } (V2 = 0) \text{ AND } (V3 = 0) \text{ AND } (V4 = 0) \text{ AND } (V5 = 0) \text{ AND } (V6 = 5) \text{ AND } (V7 = 0).$$

Модифікація компонент вектора станів здійснюється тільки для тих компонент, значення яких в наступному стані відрізняється від попереднього. Формалізований запис правила модифікації компонент вектора для отримання наступного стану (МКВС) має такий вигляд: $V1:=0; V2:=4; V7:=1$.

За такою методикою визначаються компоненти структурно-автоматної моделі для всіх наступних ситуацій, в яких відбувається базова подія БП1. Визначені компоненти структурно-автоматної моделі представлені в табл. 4.

Таблиця 3

Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БПІ

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна базова подія	Вектор стану							№ стану	Перехід з стану в стан	Формула розрахунку інтенсивності переходу
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7			
1	Ситуація 1	5	0	0	0	0	5	0	1	-	-
2	1БПІ	0	4	0	0	0	5	1	2	1→2	$p_{1-2} = \lambda_1$
	Ситуація 2	0	4	0	0	0	5	1	2		
3	2БПІ	0	0	3	0	0	5	2	3	2→3	$p_{2-3} = \lambda_2$
	Ситуація 3	0	0	3	0	0	5	2	3		
5	3БПІ	0	0	0	2	0	5	3	КВ	3→КВ	$p_{3-КВ} = \lambda_3$
	Ситуація 4	1	4	0	0	0	4	0	4		
7	4БПІ	1	0	3	0	0	4	1	6	4→6	$p_{4-6} = \lambda_2$
	Ситуація 5	2	0	3	0	0	3	0	5		
8	5БПІ	2	0	0	2	0	3	1	7	5→7	$p_{5-7} = \lambda_3$
	Ситуація 6	1	0	3	0	0	4	1	6		
9	6БПІ	1	0	0	2	0	4	2	8	6→8	$p_{6-8} = \lambda_3$
	Ситуація 7	2	0	0	2	0	3	1	7		
11	7БПІ	2	0	0	0	1	3	2	9	7→9	$p_{7-9} = \lambda_4$
	Ситуація 8	1	0	0	2	0	4	2	8		
13	8БПІ	1	0	0	0	1	4	3	КВ	8→КВ	$p_{8-КВ} = \lambda_4$
	Ситуація 9	2	0	0	0	1	3	2	9		
15	9БПІ	2	0	0	0	0	3	3	КВ	9→КВ	$p_{9-КВ} = \lambda_5$
	Ситуація 10	3	0	0	2	0	2	0	10		
17	10БПІ	3	0	0	0	1	2	1	12	10→12	$p_{10-12} = \lambda_4$
	Ситуація 11	4	0	0	0	1	1	0	11		
18	11БПІ	4	0	0	0	0	1	1	13	11→13	$p_{11-13} = \lambda_5$
	Ситуація 12	3	0	0	0	1	2	1	12		
19	12БПІ	3	0	0	0	0	2	2	14	12→14	$p_{12-14} = \lambda_5$
	Ситуація 13	4	0	0	0	0	1	1	13		
21	13БПІ	0	3	0	0	0	1	2	15	13→15	$p_{13-15} = \lambda_1$
	Ситуація 14	3	0	0	0	0	2	2	14		
23	14БПІ	0	2	0	0	0	2	3	КВ	14→КВ	$p_{14-КВ} = \lambda_1$
	Ситуація 15	0	3	0	0	0	1	2	15		
25	15БПІ	0	0	2	0	0	1	3	КВ	15→КВ	$p_{15-КВ} = \lambda_2$
	Ситуація 16	5	0	0	0	0	0	0	16		
27	16БПІ	0	4	0	0	0	0	1	18	16→18	$p_{16-18} = \lambda_1$
	Ситуація 17	1	3	0	0	0	0	1	17		
28	17БПІ	1	0	2	0	0	0	2	19	17→19	$p_{17-19} = \lambda_2$
	Ситуація 18	0	4	0	0	0	0	1	18		
29	18БПІ	0	0	3	0	0	0	2	20	18→20	$p_{18-20} = \lambda_2$
	Ситуація 19	1	0	2	0	0	0	2	19		
30	19БПІ	1	0	0	1	0	0	3	КВ	19→КВ	$p_{19-КВ} = \lambda_3$
	Ситуація 20	0	0	3	0	0	0	2	20		
31	20БПІ	0	0	0	2	0	0	3	КВ	20→КВ	$p_{20-КВ} = \lambda_3$

Таблиця 4

Компоненти структурно-автоматної моделі для базової події БП1

№	Формалізований опис ситуацій, в яких відбувається БП1	ПМКВС	ФРІП
1	2	3	4
1	Ситуація 1: (V1=5) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=5) AND (V7=0).	V1:=0; V2:=4; V7:=1	p ₁₋₂ = λ ₁
2	Ситуація 2: (V1=0) AND (V2=4) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=5) AND (V7=1).	V2:=0; V3:=3; V7:=2	p ₂₋₃ = λ ₂
3	Ситуація 3: (V1=0) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=5) AND (V7=1).	V3:=0; V4:=2; V7:=3	p _{3-КВ} = λ ₃
4	Ситуація 4: (V1=1) AND (V2=4) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=4) AND (V7=0).	V2:=0; V3:=3; V7:=1	p ₄₋₆ = λ ₂
5	Ситуація 5: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=3) AND (V7=0).	V3:=0; V4:=2; V7:=1	p ₅₋₇ = λ ₃
6	Ситуація 6: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=4) AND (V7=1).	V3:=0; V4:=2; V7:=1	p ₆₋₈ = λ ₃
7	Ситуація 7: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=0) AND (V6=3) AND (V7=1).	V4:=0; V5:=1; V7:=2	p ₇₋₉ = λ ₄
8	Ситуація 8: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=0) AND (V6=4) AND (V7=2).	V4:=0; V5:=1; V7:=3	p _{8-КВ} = λ ₄
9	Ситуація 9: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1) AND (V6=3) AND (V7=2).	V5:=0; V7:=3	p _{9-КВ} = λ ₅
10	Ситуація 10: (V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=0) AND (V6=2) AND (V7=0).	V4:=0; V5:=1; V7:=1	p ₁₀₋₁₂ = λ ₄
11	Ситуація 11: (V1=4) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1) AND (V6=1) AND (V7=0).	V1:=0; V2:=4; V7:=1	p ₁₁₋₁₃ = λ ₅
12	Ситуація 12: (V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1) AND (V6=2) AND (V7=1).	V5:=0; V7:=2	p ₁₂₋₁₄ = λ ₅
13	Ситуація 13: (V1=4) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=1) AND (V7=1).	V1:=0; V2:=3; V7:=2	p ₁₃₋₁₅ = λ ₁
14	Ситуація 14: (V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=2) AND (V7=2).	V1:=0; V2:=2; V7:=3	p _{14-КВ} = λ ₁
15	Ситуація 15: (V1=0) AND (V2=3) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1) AND (V6=1) AND (V7=2).	V2:=0; V3:=2; V7:=3	p _{15-КВ} = λ ₂
16	Ситуація 16: (V1=5) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=0).	V1:=0; V2:=4; V7:=1	p ₁₆₋₁₈ = λ ₁
17	Ситуація 17: (V1=1) AND (V2=3) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=0) AND (V7=1).	V2:=0; V3:=2; V7:=2	p ₁₇₋₁₉ = λ ₂

Продовження табл. 4

1	2	3	4
18	Ситуація 18: $(V1=0) \text{ AND } (V2=4) \text{ AND } (V3=0) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V5=0) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V7=1)$.	$V2:=0; V3:=3; V7:=2$	$p_{18-20} = \lambda_2$
19	Ситуація 19: $(V1=1) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=2) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V5=0) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V7=2)$.	$V3:=0; V4:=1; V7:=3$	$p_{19-KB} = \lambda_3$
20	Ситуація 20: $(V1=0) \text{ AND } (V2=0) \text{ AND } (V3=3) \text{ AND } (V4=0) \text{ AND } (V5=0) \text{ AND } (V6=0) \text{ AND } (V7=0)$.	$V3:=0; V4:=2; V7:=3$	$p_{20-KB} = \lambda_3$

Після отримання компонент структурно-автоматної моделі для всіх ситуацій у яких відбувається БПІ, необхідно провести зведення представлень однотипних ситуацій до одного представлення (об'єднання представлень однотипних ситуацій в одному представленні).

4.3. Об'єднання представлень однотипних ситуацій визначених для базової події БПІ

За якими ознаками ситуації для базової події вважаються однотипними і підлягають об'єднанню?

Для визнання ситуацій для базової події однотипними та їх об'єднання необхідне виконання таких трьох умов:

а) коли логічні вирази опису кількох ситуацій можна замінити одним виразом приймаючи до уваги, що: всі однойменні компоненти вектора станів мають однакові значення або частина однойменних компонент мають однакові значення, а для решти однойменних компонент можна задати межі для урахування їх значень;

б) коли однаковими є формули для визначення інтенсивностей переходів для графа;

в) коли у всіх ситуаціях модифікацію треба виконати для однакових компонент вектора станів, і правила модифікації є однаковими; або якщо правила модифікації для всіх компонент крім одної є однаковими, а у одної компоненти (наприклад V7), яка підлягає модифікації, в логічних виразах для ситуацій значення є різними, і в правилах модифікації це значення має бути збільшене або зменшене на фіксоване число (наприклад, 1). В об'єднаному представленні однотипних ситуацій правило модифікації для компоненти V3 буде мати такий вигляд: $V7:=V7+1$.

Приймаючи до уваги подані ознаки для базової події БПІ однотипними є ситуації: перша група – 1, 13, 14, 16; друга група – 2, 4, 15, 17, 18; третя група – 3, 5, 6, 19, 20; четверта група – 7, 8, 10; п'ята група – 9, 11, 12.

Розглянемо процес об'єднання компонент САМ першої групи однотипних ситуацій для базової події БПІ.

1. В логічних виразах, що представляють (описують) ситуації 1, 13, 14, 16 компонента V1 приймає значення 5, 4 і 3. Зауважимо, що вектор стану із значенням компоненти $V1=2$, вказує на те, що фрагмент КОС є непрацездатним. А у графа станів це відповідає поглинаючому стану. Тому для базової події БПІ є актуальними стани, в яких $V1>2$.

Компоненти вектора станів V2, V3, V4, V5 мають значення 0. Тому для забезпечення компактності представлення логічного виразу використаємо такий запис: $(V2+V3+V4+V5) = 0$.

Значення компоненти вектора станів V6 (кількість резервних ССЗСД) може бути будь-яким з усіх можливих і зміні після базової події БПІ не підлягає. Тому компоненту V6 в об'єднуючий логічний вираз включати не треба.

Значення компоненти вектора станів V7 також може бути будь-яким з усіх можливих. Але після того, як відбулася базова події БПІ значення компоненти V7 (кількість несправних ССЗСД на контрольованій ділянці) зростає на 1. Тому компоненту V7 включено в об'єднуючий логічний вираз у вигляді такої умови: $V7 < 3$. Зауважимо, що при $V7 = 3$ на контрольованій ділянці залишилися 2

працездатні ССЗСД. А це згідно умови появи критичної відмови означає, що КОС не буде фіксувати перетин порушником такої контрольованої ділянки.

На підставі наданого обґрунтування об'єднуючий логічний вираз для заміни чотирьох логічних виразів має такий вигляд:

$$(V1 > 2) \text{ AND } ((V2 + V3 + V4 + V5) = 0) \text{ AND } (V7 < 3).$$

2. Формули для розрахунку інтенсивностей переходів зі стану в стан для всіх ситуацій є однакові: $p_{i,j} = \lambda_1$.

3. Правила модифікації компонент вектора станів є такими: при будь-яких значеннях компоненти $V1$ від 3 до 5 відмова ССЗСД (БП1) свідчить про те, що експлуатаційний ресурс решти ССЗСД вичерпано. Однак так як вони продовжують працювати, то показник їхньої надійності “середнє значення тривалості роботи до відмови” буде меншим від початкового значення. Тобто інтенсивність базових подій БП1 λ_2 буде мати більше значення від початкового λ_1 . Отже компоненті $V1$ треба присвоїти значення нуль. Значення компоненти $V2$ залежить від того, яке значення мала компоненти $V1$ до базової події БП1. Тому $V2$ отримує значення $V1-1$. Компоненти $V3, V4, V5$ і $V6$ залишаються без змін. Для компоненти $V7$ треба показати, що після базової події БП1 на контрольованій ділянці на одну збільшилася кількість непрацездатних ССЗСД.

За аналогічною методикою визначені компоненти САМ для базової події БП1 після об'єднання однотипних ситуацій другої, третьої, четвертої та п'ятої груп. Результати занесено в табл. 5.

Таблиця 5

**Компоненти структурно-автоматної моделі для БП1
після заміни логічних виразів всіх однотипних ситуацій одним логічним виразом**

№	Формалізований опис ситуацій для БП1	ПМКВС	ФРІП
1	$(V1 > 2) \text{ AND } ((V2 + V3 + V4 + V5) = 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V1 := 0; V2 := V1 - 1; V7 := V7 + 1$	$P_{\text{БП1ос1}} = \lambda_1$
2	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V2 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V2 := 0; V3 := V2 - 1; V7 := V7 + 1$	$P_{\text{БП1ос2}} = \lambda_2$
3	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V3 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V3 := 0; V4 := V3 - 1; V7 := V7 + 1$	$P_{\text{БП1ос3}} = \lambda_3$
4	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V4 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V4 := 0; V5 := V4 - 1; V7 := V7 + 1$	$P_{\text{БП1ос4}} = \lambda_4$
5	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V5 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V5 := 0; V7 := V7 + 1$	$P_{\text{БП1ос5}} = \lambda_5$

4.4. Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП2

Визначення компонент структурно-автоматної моделі для базової події БП2 виконано аналогічно, як і для базової події БП1. Вибрані з табл. 2 фрагменти опорного графа станів і переходів “показують” 10 ситуацій, в яких відбувається базова подія БП2. На основі представлених ситуацій визначаємо компоненти структурно-автоматної моделі для БП2. Визначені компоненти структурно-автоматної моделі представлені в табл. 6.

Після отримання компонент структурно-автоматної моделі для всіх ситуацій у яких відбувається БП2, необхідно провести зведення представлень однотипних ситуацій до одного представлення (об'єднання представлень однотипних ситуацій в одному представленні).

4.5. Об'єднання представлень однотипних ситуацій, визначених для базової події БП2

Приймаючи до уваги ознаки однотипності для базової події БП2 однотипними є ситуації: перша група – 1, 3, 4, 7, 8, 9; друга група – 2, 5, 6. В третій групі є одна ситуація 10. Після зведення однотипних ситуацій першої та другої груп компоненти САМ для БП2 набувають вигляду показаному в табл. 7.

Таблиця 6

Компоненти структурно-автоматної моделі для базової події БП2

№	Формалізований опис ситуацій для БП2	ПМКВС	ФРП
1	Ситуація 1: (V1=0) AND (V2=4) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=5) AND (V7=1).	V1:=V1+1; V6:=V6-1; V7:=0	$p_{i-j} = 1/T_{zc}$
2	Ситуація 2: (V1=0) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=5) AND (V7=2).	V1:=V1+2; V6:=V6-2; V7:=0	
3	Ситуація 3: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=3) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=4) AND (V7=1).	V1:=V1+1; V6:=V6-1; V7:=0	
4	Ситуація 4: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=0) AND (V6=3) AND (V7=1).	V1:=3; V6:=2; V7:=0	
5	Ситуація 5: (V1=1) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=0) AND (V6=4) AND (V7=2).	V1:=3; V6:=2; V7:=0	
6	Ситуація 6: (V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1) AND (V6=3) AND (V7=2).	V1:=4; V6:=1; V7:=0	
7	Ситуація 7: (V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1) AND (V6=2) AND (V7=1).	V1:=4; V6:=1; V7:=0	
8	Ситуація 8: (V1=4) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=1) AND (V7=1).	V1:=5; V6:=0; V7:=0	
9	Ситуація 9: (V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=2) AND (V7=1).	V1:=5; V6:=0; V7:=0	
10	Ситуація 10: (V1=0) AND (V2=3) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=0) AND (V6=1) AND (V7=2).	V1:=1; V6:=0; V7:=1	

Таблиця 7

Компоненти структурно-автоматної моделі для БП2 після заміни логічних виразів всіх однотипних ситуацій одним логічним виразом

№	Формалізований опис ситуацій для БП2	ПМКВС	ФРП
1	$((V1+V2+V3+V4+V5)<5) \text{ AND } ((V1+V2+V3+V4+V5)>3) \text{ AND } (V6>0) \text{ AND } (V7=1)$	V1:=V1+1; V6:=V6-1; V7:=V7-1;	$p_{i-j} = 1/T_{zc}$
2	$((V1+V2+V3+V4+V5)<4) \text{ AND } (V6>1) \text{ AND } (V7=2)$	V1:=V1+2; V6:=V6-2; V7:=0.	
3	$((V1+V2+V3+V4+V5)=3) \text{ AND } (V6=1) \text{ AND } (V7=2)$	V1:=V1+1; V6:=V6-1; V7:=V7-1;	

Компоненти структурно-автоматної моделі для базових подій БП1 і БП2 зводимо разом в табл. 8. Після введення розробленої структурно-автоматної моделі в програмний модуль АСНА [24] в розпорядженні Розробника буде програмна дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації.

Таблиця 8

Структурно-автоматна модель комплексу охоронної сигналізації

Ситуація	Формалізований опис ситуацій, в яких відбуваються базові події	ПМКВС	ФРІП
<i>Ситуації, в яких відбувається базова подія БП1</i>			
1	$(V1 > 2) \text{ AND } ((V2 + V3 + V4 + V5) = 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V1 := 0; V2 := V1 - 1; V7 := V7 + 1$	λ_1
2	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V2 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V2 := 0; V3 := V2 - 1; V7 := V7 + 1$	λ_2
3	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V3 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V3 := 0; V4 := V3 - 1; V7 := V7 + 1$	λ_3
4	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V4 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V4 := 0; V5 := V4 - 1; V7 := V7 + 1$	λ_4
5	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 2) \text{ AND } (V5 > 0) \text{ AND } (V7 < 3)$	$V5 := 0; V7 := V7 + 1$	λ_5
<i>Ситуації, в яких відбувається базова подія БП2</i>			
1	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) < 5) \text{ AND } ((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) > 3) \text{ AND } (V6 > 0) \text{ AND } (V7 = 1)$	$V1 := V1 + 1; V6 := V6 - 1; V7 := 0$	$1/T_{3c}$
2	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) < 4) \text{ AND } (V6 > 1) \text{ AND } (V7 = 2)$	$V1 := V1 + 2; V6 := V6 - 2; V7 := 0$	$1/T_{3c}$
3	$((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) = 3) \text{ AND } (V6 = 1) \text{ AND } (V7 = 2)$	$V1 := V1 + 1; V6 := V6 - 1; V7 := V7 - 1$	$1/T_{3c}$
Умова переходу графа в об'єднаний стан критичних відмов: $((V1 + V2 + V3 + V4 + V5) = 2)$			

Програмна стохастична модель здійснює: побудову графа станів і переходів для будь-яких доцільних значень параметрів і показників надійності та функціональності складових; формує систему диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена та здійснює її розв'язання; визначає показники надійності “ймовірність безвідмовної роботи для заданої тривалості неперервної роботи” та “середнє значення тривалостей неперервної безвідмовної роботи”.

Система диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена, яка представляє дискретно-неперервну стохастичну модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_1 P_1(t) \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_1 P_1(t) - \left(\lambda_2 + \frac{1}{T_{3c}} \right) P_2(t) \\
 &\dots \\
 \frac{dP_{19}(t)}{dt} &= \lambda_2 P_{17}(t) - \lambda_3 P_{19}(t) \\
 \frac{dP_{20}(t)}{dt} &= \lambda_2 P_{18}(t) - \lambda_3 P_{20}(t) \\
 \frac{dP_{KB}(t)}{dt} &= \lambda_3 P_3(t) + \lambda_4 P_8(t) + \lambda_5 P_9(t) + \lambda_1 P_{14}(t) + \lambda_3 P_{15}(t) + \lambda_3 P_{19}(t) + \lambda_3 P_{20}(t).
 \end{aligned}$$

За допомогою програмної стохастичної моделі Розробник на етапі системотехнічного проектування має змогу суттєво зменшити витрати часу на прийняття обґрунтованих технічних рішень, що базуються на віртуальному дослідженні експлуатаційної поведінки КОС при перетині порушниками контрольованої ділянки. Далі показано розв'язання задачі визначення вимог до технічного обслуговування ССЗСД комплексу охоронної сигналізації.

5. Визначення вимог до технічного обслуговування сигналізаційних систем, встановлених на контрольованих ділянках периметра об'єкта критичної інфраструктури (приклад)

Для підрозділу об'єкта критичної інфраструктури (служба охорони), працівники якого будуть здійснювати технічне обслуговування КОС, необхідно визначити допустиме значення тривалості заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра та кількості резервних ССЗСД на заданий термін його експлуатації. Отримані значення мають гарантувати безвідмовну неперервну роботу КОС упродовж 2-х років, тобто 17550 годин. Старіння ССЗСД в процесі їхньої експлуатації враховано, як приклад, з коефіцієнтом старіння 5.

В якості початкового варіанта даних використані дані валідаційного дослідження розробленої стохастичної моделі. За значень показників надійності, що були використані як початкові в ході валідаційних досліджень розробленої стохастичної моделі, фрагмент КОС забезпечує 10600 годин безвідмовної неперервної роботи, що не відповідає вимозі. Ці значення показані нульовим варіантом в табл. 9.

Для підтримання надійної роботи КОС сформульовані пропозиції щодо вибору відповідних параметрів стратегії технічного обслуговування ССЗСД, встановлених на контрольованих ділянках охорони периметра. Ефективність пропозицій оцінюється досягненням необхідного середнього значення тривалостей безвідмовної роботи фрагмента КОС 17550 годин. Проведено дослідження доцільності для використання таких пропозицій:

- пропозиція 1: збільшити кількість резервних ССЗСД;
- пропозиція 2: зменшити допустиме значення тривалості заміни несправної ССЗСД;
- пропозиція 3: комбінований варіант, який передбачає збільшення кількості резервних ССЗСД та зменшення допустимого значення тривалості заміни несправної ССЗСД;
- пропозиція 4: встановити (використати) ССЗСД з вищою надійністю (з меншим значенням показника його надійності “інтенсивність відмов”);
- пропозиція 5: комбінований варіант, який передбачає зменшення початкового значення інтенсивності відмов ССЗСД, збільшення кількості резервних ССЗСД та зменшення допустимого значення тривалості заміни несправної ССЗСД.

Зауважимо, що процес заміни несправної ССЗСД має велику тривалість, так як включає в себе: інтервал часу від моменту втрати працездатності до моменту отримання повідомлення в службі охорони (залежить від методу виявлення, наприклад, засіб контролю приймає рішення про несправну ССЗСД після трьох перетинів порушниками контрольованої ділянки, які зафіксовані іншими ССЗСД в цій контрольованій ділянці, і будуть відсутні повідомлення від несправної ССЗСД); тривалість очікування ремонтником можливості вийти на відповідну ділянку (наприклад, очікування ночі); тривалість роботи безпосередньо з заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці охорони периметра.

Кожна пропозиція має багато варіантів реалізації, які відрізняються значеннями параметрів: кількості резервних ССЗСД, коефіцієнта старіння ССЗСД, інтенсивності відмов ССЗСД, середнього значення тривалостей заміни несправної ССЗСД.

Після отримання показників надійності фрагмента КОС для п'яти пропозицій до стратегії технічного обслуговування можна зробити висновки про доцільність ситуаційного застосування кожного з варіантів. Результати досліджень представлені в табл. 9.

В табл. 9 показані знайдені через багатоваріантний аналіз значення показників та параметрів, які забезпечують вимогу до заданого середнього значення тривалостей безвідмовної неперервної експлуатації КОС. Однак варто звернути увагу на низькі значення показника ймовірності безвідмовної роботи КОС.

Для того, щоб підвищити значення показника ймовірності безвідмовної роботи фрагмента КОС для заданої тривалості його безперервної експлуатації, розробник може визначити, на скільки треба підвищувати надійність ССЗСД (зменшувати значення його показників “інтенсивність відмов” та коефіцієнта старіння). Зауважимо, що в реальному проектуванні мінімальне значення показника “інтенсивність відмов” ССЗСД обмежується надійністю радіокомпонентів, які є доступними для розробника.

Зауважимо, що програмна стохастична модель дає змогу визначати кількість резервних ССЗСД за інших значень коефіцієнта їх старіння.

Таблиця 9

Порівняння п'яти пропозицій до стратегії технічного обслуговування КОС

Пропозиції Параметри та показники	0	1	2	3	4	5
Кількість резервних ССЗСД	5	23	5	13	5	8
Коефіцієнт старіння ССЗСД	5	5	5	5	5	5
Інтенсивність відмов ССЗСД, 1/год.	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Середнє значення тривалостей заміни несправної ССЗСД, год	24	24	1	16	24	16
Середнє значення тривалостей безвідмовної неперервної роботи фрагментів КОС, год	10600	18214	12430	17827	17600	17554
Ймовірність безвідмовної неперервної роботи для заданої тривалості експлуатації фрагментів КОС протягом 2 років	0,14	0.433	0.2	0.463	0.415	0.437

Висновок до пропозиції 1: збільшення кількості резервних ССЗСД до 23 має забезпечити необхідний рівень середнього значення тривалостей безвідмовної роботи 17550 годин.

Висновок до пропозиції 2: зменшення тривалості заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці периметра до 1 години, не може забезпечити необхідний рівень середнього значення тривалостей безвідмовної роботи 17550 годин.

Висновок до пропозиції 3: збільшення кількості резервних ССЗСД та зменшення тривалості заміни несправної ССЗСД в контрольованій зоні периметра має забезпечити необхідний рівень середнього значення тривалостей безвідмовної роботи 17550 годин (див. табл. 9). Для цього в резерві треба мати не менше 13 сигналізаційних систем замість 23, які були необхідними у першому варіанті, та тривалість заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці периметра не має перевищувати 16 годин.

Висновок до пропозиції 4: використання більш надійних ССЗСД дозволяє забезпечити необхідний рівень середнього значення тривалостей безвідмовної роботи 17550 годин (див. таблицю 9). Для цього значенням показника надійності ССЗСД “інтенсивність відмов” не має перевищувати $1,28 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Інші параметри відповідають параметрам нульового варіанта.

Висновок до пропозиції 4: використання більш надійних ССЗСД і поєднання двох способів, а саме незначне по відношенню до нульового варіанта збільшення кількості резервних ССЗСД та зменшення тривалості заміни несправної ССЗСД в контрольованій зоні периметра дозволяє забезпечити необхідний рівень середнього значення тривалостей безвідмовної роботи 17550 годин (див. табл. 9). Для цього значенням показника надійності ССЗСД “інтенсивність відмов” не має перевищувати $1,7 \cdot 10^{-4}$ 1/год, в резерві треба мати не менше 8 сигналізаційних систем замість 5, які були необхідними у нульовому варіанті, та тривалість заміни несправної ССЗСД на контрольованій ділянці периметра не має перевищувати 16 годин.

Висновки

Показано процес розроблення структурно-автоматної моделі експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації, у якого відповідником є відмовостійка система мажоритарного типу з правилом голосування {3 із 5}. В структурно-автоматній моделі, а відтак і в дискретно-неперервній стохастичній моделі, враховано: показник надійності сигналізаційних систем “інтенсивність відмов”; важливий для охоронних систем показник швидкості старіння сигналізацій-

них систем, встановлених на контрольованих ділянках периметра об'єкта критичної інфраструктури; великі значення інтервалів часу від моменту появи на контрольованій ділянці несправної ССзСД до моменту її заміни; обмеження на кількість резервних систем у службі ремонту для заданої тривалості неперервної експлуатації комплексу охоронної сигналізації. Розроблена структурно-автоматна модель поповнить бібліотеку моделей інформаційної технології проектування відмовостійких систем мажоритарного типу з правилом голосування $\{3 \text{ із } 5\}$.

Після введення розробленої структурно-автоматної моделі в програмний модуль АСНА в розпорядженні Розробника буде програмна дискретно-неперервна стохастична модель експлуатаційної надійнісної поведінки фрагмента комплексу охоронної сигналізації. Така програмна стохастична модель має необхідний ступінь адекватності, який забезпечує розв'язання задач надійнісного синтезу показників і параметрів складових комплексу з високим рівнем достовірності та з мінімальними затратами часу. З використанням програмної стохастичної моделі показано визначення вимог до технічного обслуговування сигналізаційних систем, встановлених на контрольованих ділянках периметра об'єкта критичної інфраструктури.

Список використаних джерел

- [1] Чернишук П. Д. Дослідження способів забезпечення довготривалої неперервної експлуатації комплексу охоронної сигналізації на основі сейсмотатчиків з урахуванням їх старіння. – Магістерська кваліфікаційна робота, Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2021. 80 с.
- [2] Сальник Ю. П., Волочій Б. Ю. Стохастична модель функціональної поведінки охоронної системи об'єкта критичної інфраструктури / Сучасні інформаційні системи. Т. 5, № 1. Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, 2021. С. 18–33.
- [3] Федасюк Д. В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після процедур контролю, перемикання і відновлення / Д. В. Федасюк, С. Б. Волочій // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” : “Комп’ютерні науки та інформаційні технології”. Львів : вид-во Львівської політехніки. 2017. № 864. С. 49–62.
- [5] Погребенник В. Д. Принципи побудови систем охоронної сигналізації / В. Д. Погребенник, Р. В. Політило // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. 2008. № 608. С. 93–99. URL https://vlp.com.ua/files/14_3.pdf.
- [6] Павленко О. А. Перспективи застосування волоконно-оптичних, сейсмічних датчиків виявлення порушень зон охорони військових об'єктів / О. А. Павленко, П. В. Бірюков / зб. наук. пр. [Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації]. Київ: Вид-во ВІТІ ДУТ, 2018. С. 55–64. URL: http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2018/7_3_2018.pdf.
- [7] Нікіфоров М. М. Особливості використання стаціонарних систем охорони периметру військових об'єктів / М. М. Нікіфоров // зб. наук. пр. Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2019. № 63. С. 27–36. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu_2019_63_6.
- [8] Нікіфоров М. М. Особливості використання автоматизованого сейсмоакустичного комплексу за допомогою комбінованого способу виявлення об'єктів / М. М. Нікіфоров, І. В. Памтуха, В. М. Лоза, С. В. Щербіна, А. Г. Шевцов // Геофизический журнал. 2018. Т. 40, № 6. С. 150–158. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/145655/10-Nikiforov.pdf?sequence=1>.
- [9] Волочій Б. Ю., Онищенко В. А. Моделювання реакції комплексу охоронної сигналізації на появу рухомого об'єкта сейсмотатчиками, розміщеними у дальній та ближній зонах контролю. Військово-технічний збірник. 10 (Травень 2014), 7–12.
- [10] Волочій Б. Ю., Онищенко В. А. Модель процесу взаємодії розвідувально-сигналізаційного комплексу з об'єктом виявлення з урахуванням особливостей оперативно-тактичної обстановки. Військово-технічний збірник, (8), 2013. 50–56.
- [11] Колесник К. В. Методы статического моделирования радиотехнических систем контроля охранных периметров объектов / К. В. Колесник, Ю. П. Мачехин, Г. И. Чурюмов // Системы обработки информации. 2010. № 1(82). С. 61–65.
- [12] Vrabel R., Abas M., Tanuska P., Vazan P., Kebisek M., Elias M., Sutova Z., Pavliak D. Mathematical Approach to Security Risk Assessment. Math. Probl. Eng. 2015, 417597. URL: [PDF] [Mathematical Approach to Security Risk Assessment | Semantic Scholar](#).
- [13] Волочій Б. Ю. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Київ. 2012. Вип. 48. С. 117–125.
- [14] Волочій Б. Ю. Надійнісна модель відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури $\{3 \text{ із } 5\}$ з комбінованим структурним резервуванням та з відновленням / Б. Ю. Волочій, В. М. Якубенко, М. М. Змисний //

- Вісник національного університету “Львівська політехніка” № 885. *Радіoeлектроніка та телекомунікації*. 2017. Львів, Вид-во НУ “Львівська політехніка”. С. 154–167.
- [15] Мандзій Б. А. Порівняльна оцінка надійності трьох конфігурацій відмовостійкої системи з мажоритарною структурою / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний, О. В. Муляк // *Радіoeлектроніка. Інформатика. Управління*. 2012. № 2. С. 44–50.
- [16] Volochiy B., Ozirkovsky L., Zmysnyi M., Kulyk I. Designing of Fault-Tolerant Radioelectronic Systems with Majority Structure // *Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції TCSET 2010 „Сучасні проблеми радіoeлектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії”*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2010. С. 35.
- [17] Volochiy B. The Reliability Model of Fault-Tolerant System with the Majority Structure and Considering the Change in the Failure Rate of the Core Module During Operation. / B. Volochiy, V Yakubenko, M. Zmysnyi // *Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020)*, Lviv-Slavske, Ukraine, February 25–29.2020. P. 211–214.
- [18] Харченко В. С. Модели надежности информационно-управляющих систем с сетевым многоярусным мостиковым мажоритированием / В. С. Харченко, В. В. Скляр, А. Д. Герасименко // *Радіoeлектронні і комп’ютерні системи*. 2007. № 6. С. 196–201.
- [19] D’Angelo S., Metra C., Pastore S., Pogutz A. and Sechi G. R. “Fault-tolerant voting mechanism and recovery scheme for TMR FPGA-based systems”, *Proceedings 1998 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (Cat. No.98EX223)*, 1998. Pp. 233–240. DOI: 10.1109/DFTVS.1998.732171.
- [20] Управление старением и долгосрочная эксплуатация элементов и конструкций энергоблоков АЭС / С. П. Костенко, В. В. Ключко, О. И. Казимирская // *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 3. С. 31–35.
- [21] Evaluating the Effects of Aging on Electronic Instrument and Control Circuit Boards and Components in Nuclear Power Plants. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/841248>.
- [22] Волочий Б. Ю., Якубенко В. М., Сальник Ю. П., Змисний М. М. Дослідження впливу старіння модулів ядра відмовостійкої системи мажоритарного типу на значення показників її надійності / *Системи управління, навігації і зв’язку*. Вип. 1 (63). Полтава: Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”, 2021. С. 36–44.
- [23] Волочий Б. Програмна стохастична модель експлуатаційної поведінки відмовостійких систем мажоритарного типу з правилом голосування {3 із 5} / Б. Волочий, В. Якубенко, Ю. Сальник, П. Чернишук // *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Вип. 1, №2, 2021. С. 94–113.
- [24] Волочий Б. Ю. Системотехнічне проектування телекомунікаційних мереж. Практикум / Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський. Львів: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2012. 128 с.

DISCRETE-CONTINUOUS STOCHASTIC MODEL OF OPERATIONAL RELIABLE BEHAVIOR OF THE SECURITY ALARM SYSTEM

Bohdan Volochiy, Pavlo Chernyshuk¹, Yuriy Salnyk, Volodymyr Onishchenko²

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

² Hetman Petro Sagaidachny National Academy of Land Forces, 32, Heroiv Maidan Str., Lviv, 79013, Ukraine

For long-term operation of the security alarm system of a critical infrastructure facility, it is important to maintain alarm systems with seismic sensors installed in controlled areas of its perimeter. The task of forming a maintenance strategy requires reliable data on the required number of backup alarm systems for a given duration of operation and the permissible value of the duration of the process of replacing a faulty alarm system. The article shows a stochastic model of the operational reliable behavior of a fragment of the security alarm complex with the installation of five alarm systems with seismic sensors in the controlled area of the perimeter. The configuration of five alarm systems with seismic sensors installed on the controlled areas of the perimeter provides the use of the majority principle with the rule {3 out of 5} to decide on the type of intruder. At the same time, the majority principle provides an effective way to detect an inoperable alarm system with seismic sensors, which is important for the maintenance of the security alarm system. Such a model is necessary for choosing an appropriate option for the maintenance strategy of the security alarm system, which will provide a given value of its reliability for long-term operation.

Keywords: alarm system with seismic sensor, aging of alarm systems, operational behavior, fault-tolerant system of majority type, stochastic model of operational behavior.