

ПИТАННЯ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ТЕРОРИСТИЧНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЯЛЬНІСТЮ ВІЙСЬКОВИХ ЧАСТИН (ПІДРОЗДІЛІВ) ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-96-105

УДК 623.48(477)

¹**Авраменко Олександр Васильович** (доктор технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-1358-1185>

¹**Сарапін Юрій Олександрович**

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

¹**Яблонський Петро Михайлович** (кандидат технічних наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

²**Федоров Олексій Валерійович**

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

¹*Національний університет оборони України, Київ, Україна*

²*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна*

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СИСТЕМИ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ОПОВІЩУВАННЯ НА ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ БОЄПРИПАСІВ (АВІАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ)

В роботі досліджено актуальне питання підвищення надійності систем пожежної сигналізації та оповіщення (СПСО) на об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження).

З використанням напівмарковського випадкового процесу побудовано математичну модель експлуатування СПСО, здійснено аналітичні розрахунки середнього часу перебування СПСО у справному стані, у будь-якому стані та частоти потрапляння випадкового процесу до різних станів, що дозволяє знайти значення коефіцієнта технічного використання з урахуванням різних параметрів експлуатування систем. Запропонований метод математичного моделювання передбачає застосування дифузійного немонотонного закону розподілу часу перебування СПСО у станах моделі. На основі отриманих аналітичних залежностей можливо знайти максимальне значення коефіцієнта технічного використання, що відповідатиме оптимальній періодичності технічного обслуговування СПСО.

Отримані в роботі результати можуть бути використані для розробки методики підвищення ефективності експлуатування СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності проведення їх ТО, що сприятиме підвищенню надійності СПСО на військових об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження) та в довгостроковій перспективі покращить рівень захисту цих об'єктів від виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

***Ключові слова:** надзвичайна ситуація, загроза, ризик, запобігання, відмова, технічне обслуговування, математична модель, закон розподілу.*

Вступ

Однією із основних цілей реалізації державної політики у військовій сфері, сфері оборони і військового будівництва є створення ефективної системи логістичного забезпечення військ (сил) та накопичення достатніх запасів матеріальних засобів, у тому числі ракет, боєприпасів, авіаційних засобів ураження та інших вибухових речовин (далі – боєприпаси), що відповідають потребам сил оборони. Важливими складовими елементами системи логістичного забезпечення військ (сил) є арсенали, центри, бази, склади, де

зберігаються боєприпаси (далі – військові об'єкти).

Міністерство оборони України (МОУ) є секторальним органом, що забезпечує зберігання боєприпасів [1].

Протягом останніх років, внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру (НСТХ) на військових об'єктах, було втрачено значну частину боєприпасів [2].

Проведений аналіз [2] свідчить, що переважна більшість НСТХ, що сталися на військових об'єктах, виникали внаслідок або із

супроводженням пожеж. Тобто загроза від пожеж на військових об'єктах очевидна.

Практичний досвід ліквідації НСТХ вказує, що процес гасіння пожеж на військових об'єктах можна умовно поділити на два етапи: перший – гасіння пожежі до початку вибухів боєприпасів, другий – гасіння пожежі, що супроводжується вибухами боєприпасів [3-4]. Другий етап характеризується значною кількістю ризиків та загроз, пов'язаних з вибухами, розлітанням на значну відстань осколків та снарядів, уражальною дією надлишкового тиску, що утворюється під час детонації боєприпасів, утворенням нових осередків пожеж, тощо. Тому завдання щодо ліквідації пожеж на першому етапі, до початку вибухів боєприпасів, є одним із основних для запобігання виникненню НСТХ.

Відомо, що одним із основних принципів побудови будь-якої системи безпеки, у тому числі і системи захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ, – є превентивність. Превентивність негативному впливу пожеж на військових об'єктах реалізується шляхом використання систем пожежної сигналізації та оповіщення (СПСО).

У системі МОУ передбачено, що на військових об'єктах усі місця зберігання боєприпасів обладнуються СПСО [5]. З урахуванням потенційної загрози від пожеж на військових об'єктах очевидно, що забезпечення справності та безвідмовності СПСО є одним із головних профілактичних заходів для мінімізації ймовірності переростання пожежі у НСТХ. Регулярні роботи, що передбачають перевірку працездатності СПСО, виконання регламентних і ремонтних робіт, підтримання експлуатаційної придатності СПСО, необхідні для підтримання системи у працездатному стані (далі – технічне обслуговування), сприяють швидкому виявленню та усуненню будь-яких проблем чи недоліків в роботі СПСО, зменшуючи ризик їх несправності під час критичної події. Проте, проведений аналіз вказує на значну кількість відмов СПСО, що експлуатуються на військових об'єктах, а також хибних сигналів, що надходять від них. Причому кількість відмов та хибних сигналів збільшується по мірі збільшення часу від проведення планових технічних обслуговувань (ТО) СПСО. З огляду на це, авторами робіт [6-9] зроблено припущення, що існуюча періодичність проведення ТО СПСО на військових об'єктах не є оптимальною. Тому існує необхідність у впровадженні науково обгрунтованої періодичності ТО СПСО, що сприятиме підвищенню надійності цих систем, а також, в цілому, підвищить рівень захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ.

Питанням підвищення надійності СПСО присвячено велику кількість наукових досліджень вітчизняних та закордонних вчених. Зокрема, роботи [10] та [11] присвячені визначенню шляхів удосконалення системи виявлення та ліквідації

НСТХ на військових об'єктах. У роботі [12] зосереджується увага на формуванні засад комплексного підходу до створення системи протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури від загорань і пожеж на початковій стадії розвитку. В публікаціях [13-16] зроблено акцент на ключовому значенні надійності та безвідмовності СПСО в частині запобігання колосальних соціально-економічних втрат. Робота [17] присвячена оцінці параметрів надійності СПСО. При цьому автор зосереджує увагу на важливості регулярного моніторингу технічного стану та ТО СПСО. Авторами робіт [18] та [19] досліджуються питання низької надійності СПСО в провідних країнах світу, у тому числі питання, пов'язані з надходженням від СПСО великої кількості хибних сигналів. Робота [20] присвячена аналізу технічної документації СПСО від різних виробників та побудові узагальнених номограм технічних характеристик елементів цих систем з метою формування основи для створення “еталонного зразка СПСО”, що відповідатиме необхідному рівню надійності.

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що, не зважаючи на достатньо велику кількість досліджень в напрямку удосконалення ефективності експлуатування та підвищення надійності СПСО, актуальним завданням є пошук нових ефективних шляхів підвищення надійності СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності їх ТО.

Метою статті є розробка загальних положень методики підвищення ефективності експлуатування СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності проведення їх ТО.

Матеріали та методи

Для досягнення визначеної у статті мети використано такі методи дослідження: теоретичний аналіз – для аналізу об'єкта досліджень із системних позицій, визначення цілей його функціонування; порівняння – для встановлення подібності та/або відмінності між різними СПСО за певними ознаками, а також встановлення загального, притаманного для усіх СПСО; дедуктивний та індуктивний методи – під час дослідження надійності СПСО; формалізації – під час постановки задачі обгрунтування оптимальної періодичності проведення ТО; математичного моделювання – у ході розроблення математичної моделі експлуатування СПСО для проведення розрахунково-теоретичного дослідження впливу визначальних параметрів на ймовірність безвідмовної роботи СПСО; чисельний метод – під час побудови залежностей коефіцієнта технічного використання від досліджуваних параметрів експлуатування СПСО; графо-аналітичний метод – при побудові графічних залежностей.

Результати

У виробках електронної техніки, якими є СПСО, спостерігається немонотонний характер

змінювання деяких фізичних параметрів. Деградацію таких виробів прийнято розглядати як процес з немонотонними реалізаціями [21]. Серед типових завдань надійності, що вирішуються з використанням моделей відмов, дифузійний немонотонний розподіл (DN - розподіл) є єдиною моделлю, яка дозволяє вирішувати усі перелічені у [21] завдання надійності. Тому для СПСО за модель відмов найбільш доцільно використовувати саме DN - розподіл.

Під експлуатуванням СПСО розуміють стадію життєвого циклу, під час якого СПСО технічно готова до застосування за призначенням (рис. 1). Важливим завданням на цьому етапі є підтримання експлуатаційної придатності СПСО, під яким розуміють комплекс заходів, спрямованих на утримання системи в технічному стані, що забезпечує можливість застосування її за призначенням починаючи з уведення в експлуатацію до кінця експлуатування [22].

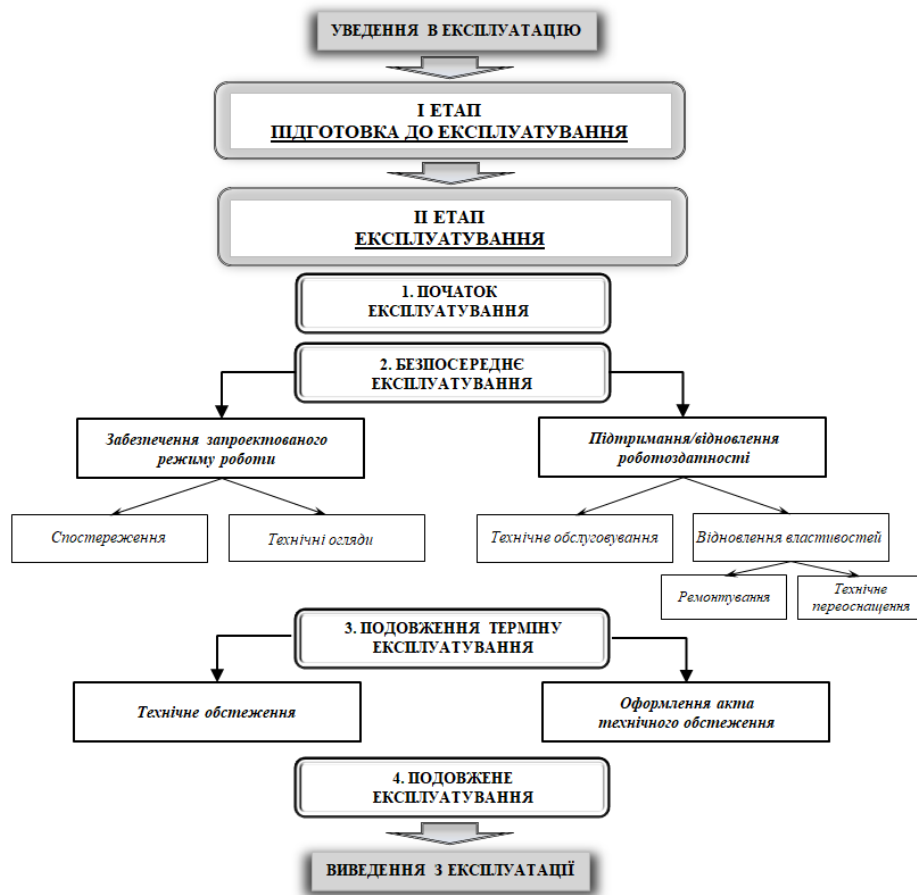


Рисунок 1. Схема експлуатації СПСО

На основі [21] та [23], з досвіду експлуатування СПСО на військових об'єктах, під параметрами математичної моделі експлуатування СПСО розуміються: періодичність проведення профілактичних заходів (ТО) та перевірки технічного стану ручною системою контролю (РСК) – T , год; тривалість виконання профілактичних заходів (ТО) – $t_{пз}$, год; тривалість контролю СПСО РСК – $t_{рск}$, год; тривалість контролю СПСО автоматизованою системою контролю (АСК) – $t_{аск}$, год; тривалість повного відновлення СПСО – $t_{в}$, год; інтенсивність надходження хибних сигналів про відмови СПСО – λ_x , 1/год; інтенсивність проявлення прихованих відмов СПСО – $\lambda_{пр}$, 1/год; вірогідність виявлення відмови СПСО РСК – $d_{рск}$; вірогідність виявлення відмови СПСО АСК – $d_{аск}$; вірогідність правильного визначення справногo стану СПСО АСК – $d_{аск}^c$;

імовірність надходження сигналу про відмову СПСО від АСК – ρ .

Стохастичний граф станів та переходів моделі експлуатування СПСО (рис. 2), враховує можливі стани, в яких перебуває система, а саме: S_1 – використання СПСО за призначенням у технічно справному стані, контроль справності здійснюється АСК; S_2 – проведення планових профілактичних заходів із перевіркою технічного стану СПСО з використанням РСК, причому в СПСО відмови немає; S_3 – виконання перевірки технічного стану СПСО АСК після фіксування у випадковий момент τ_x сигналу помилкової тривоги (хибної відмови); S_4 – повне відновлення справності СПСО (у тому числі усунення причини відмови або причини хибної відмови); S_5 – виконання перевірки технічного стану СПСО АСК після фіксування у випадковий момент τ сигналу тривоги (виявлення відмови); S_6 – проведення перевірки технічного

стану СПСО з використанням РСК під час проведення планових профілактичних заходів (в СПСО наявна відмова, що не була виявлена АСК); S_7 – використання СПСО за призначенням при наявності невиявленої (прихованої) відмови.

Кожен із зазначених станів, в яких може перебувати СПСО в період безпосереднього експлуатування, умовно розподілені за рівнями захищеності військового об'єкта в залежності від перебування СПСО в тому чи іншому стані (рис. 2). Під захищеністю військового об'єкта в роботі мається на увазі неможливість такого розвитку подій, при якому СПСО не виконає свої функції, що в результаті призведе до виникнення НСТХ на військовому об'єкті.

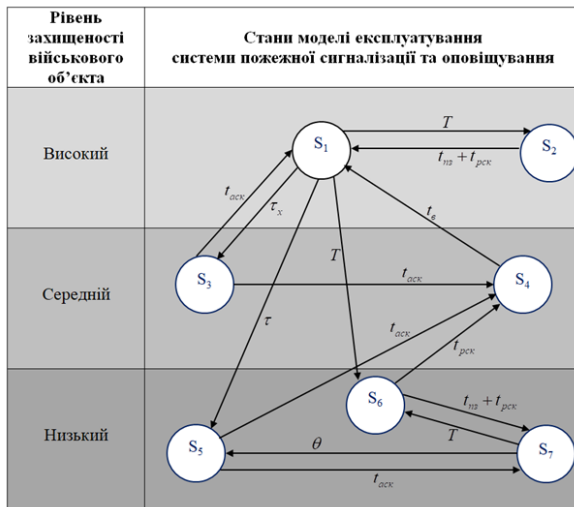


Рисунок 2. Стохастичний граф станів та переходів моделі експлуатування СПСО

Так, перебування СПСО в станах S_1 або S_2 забезпечує високий рівень захищеності військового об'єкта. Високий рівень захищеності характеризується відсутністю відмов в роботі СПСО, у тому числі хибних чи прихованих.

Середній рівень захищеності військового об'єкта можливий за умов перебування СПСО у станах S_3 або S_4 . Цей рівень захищеності характеризується наявністю хибної відмови в роботі СПСО або відмови, причина якої встановлена, при цьому вживаються заходи для її усунення, відновлення справності СПСО (переходу до стану S_1) та повернення військового об'єкта до високого рівня захищеності.

При низькому рівні захищеності військового об'єкта СПСО перебуває у станах S_5 , або S_6 , або S_7 . Тобто в роботі СПСО наявні відмови, причини яких не встановлені, або в роботі СПСО наявні невиявлені (приховані) відмови. При цьому заходи щодо "повернення" СПСО до справного стану S_1 не проводяться.

Також на рис. 2 показано напрями переходів з одного стану в інший із зазначенням часу перебування СПСО у стані S_i , $i = \overline{1,7}$. При цьому використані такі умовні позначення: τ – випадковий момент виникнення відмови СПСО на

інтервалі часу $[0, T]$; τ_x – випадковий момент виникнення хибної відмови на інтервалі часу $[0, T]$; θ – випадковий момент проявлення прихованої відмови СПСО, що була пропущена під час перевірки АСК або РСК.

Для наочної демонстрації моделі та зручності графічного відображення досліджуваних випадкових процесів зроблено припущення, що у початковий момент часу t_0 , СПСО знаходиться у стані S_1 , тобто технічно справна.

Наведений на рис. 3 приклад демонструє періодичне перебування СПСО у різних станах протягом періоду експлуатування, зокрема, в станах проведення планових перевірок, профілактичних заходів (ТО), технічної несправності внаслідок відмов, хибних тривог тощо.

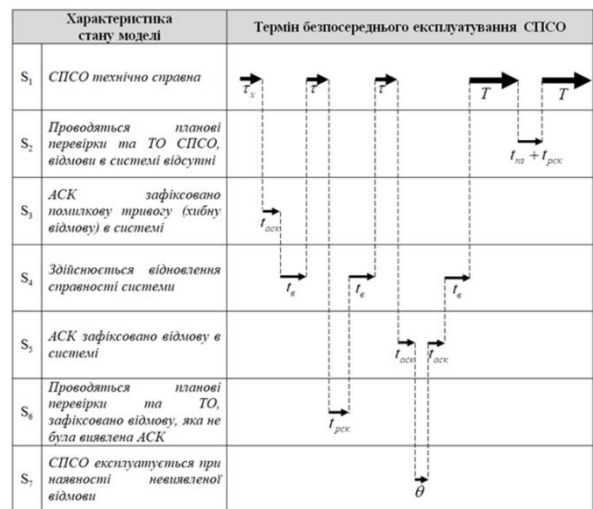


Рисунок 3. Схема реальної системи експлуатування СПСО (приклад)

Звісно, що наведений приклад реалізації випадкових процесів в системі експлуатування СПСО містить певну кількість припущень. Але такий підхід дає змогу використати апарат напівмарковського випадкового процесу для отримання корисних знань, що стосуються підвищення ефективності захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ.

Напівмарковські процеси дозволяють більш гнучко моделювати ситуації, де переходи між станами можуть бути більш складними та варіативними, ніж у класичних марковських процесах.

Однією із особливостей переходів системи експлуатування СПСО з одного стану в інший є те, що ці переходи відбуваються миттєво. Напівмарковський випадковий процес визначається матрицею перехідних ймовірностей та матрицею функцій розподілу тривалості переходу зі станів $i = \overline{1,7}$ до станів $j = \overline{1,7}$ якщо відомий початковий стан випадкового процесу.

З урахуванням властивостей напівмарковського випадкового процесу, для того щоб спростити подальші розрахунки, зроблено певні обмеження, припущення, та вважається що: величини T , $t_{вз}$, $t_{рск}$,

$t_{аск}$, $t_{в}$, використані в математичній моделі (рис. 2), не є випадковими; справедливим є DN -розподіл відмов СПСО; справедливим є експоненціальний закон розподілу часу надходження сигналів хибних тривог СПСО; справедливим є експоненціальний закон розподілу сигналів проявлення відмов, що відбулися в СПСО; здійснюється повне відновлення СПСО після виявлення відмови в системі експлуатування; відмови в роботі СПСО не пов'язані з виникненням пожеж, аварій, катастроф, надзвичайних ситуацій, терактів тощо.

Критерієм ефективності ТО СПСО є один із комплексних показників надійності – коефіцієнт технічного використання ($K_{ТВ}$), який представлено як відношення математичного сподівання сумарного часу перебування СПСО у працездатному стані за деякий період експлуатування до математичного сподівання сумарного часу перебування СПСО в працездатному стані та у простоях, зумовлених ТО і ремонтом за той самий період [23].

Іншими словами, $K_{ТВ}$ представляє собою відношення середнього часу перебування системи в

справному стані до календарного часу експлуатування. Оптимальна періодичність проведення ТО СПСО повинна забезпечувати максимальне значення $K_{ТВ}$.

Для запропонованої математичної моделі експлуатування СПСО, з урахуванням [24], значення $K_{ТВ}$ представлено у наступному вигляді:

$$K_{ТВ} = \frac{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \varphi_{s_i}(T)}{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \eta_i(T)} \quad (1)$$

де $\varphi_{s_i}(T)$ – середній час перебування СПСО справною у стані S_i ;

$\eta_i(T)$ – середній час перебування СПСО у будь-якому стані $i = \overline{1,7}$;

$\pi_i(T)$ – частота потрапляння випадкового процесу до стану $i = \overline{1,7}$.

Для побудованої моделі експлуатування СПСО розраховано матрицю перехідних імовірностей напівмарковського процесу та матрицю функцій розподілу часу перебування випадкового процесу у станах напівмарковського процесу:

$$P(T) = \begin{vmatrix} 0 & (1-F(T))e^{-\lambda_x T} & \lambda_x \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt & 0 & \rho \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & (1-\rho) \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{аск}^{cc} & 0 & 0 & 1-d_{аск}^{cc} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{аск} & 0 & 0 & 1-d_{аск} \\ 0 & 0 & 0 & d_{рск} & 0 & 0 & 1-d_{рск} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-e^{-\lambda_{пр} T} & e^{-\lambda_{пр} T} & 0 \end{vmatrix} \quad (2)$$

При цьому:

$$P_{1j}(T) = P_{12}(T) + P_{13}(T) + P_{15}(T) + P_{16}(T) = 1.$$

В матриці (2) використані такі позначення:

$F(T)$ – функція розподілу часу безвідмовної роботи СПСО;

T – періодичність проведення профілактичних заходів (ТО) та перевірки технічного стану РСК;

λ_x – інтенсивність надходження помилкових тривог та хибних сигналів про відмови СПСО;

$\lambda_{пр}$ – інтенсивність проявлення прихованих відмов СПСО;

$d_{рск}$ – вірогідність виявлення відмови СПСО РСК;

$d_{аск}$ – вірогідність виявлення відмови СПСО АСК;

$d_{аск}^{cc}$ – вірогідність правильного визначення справного стану СПСО АСК;

ρ – ймовірність надходження сигналу про відмову СПСО від АСК.

$$F_{ij}(T) = \begin{vmatrix} 0 & T & \int_0^t e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt & 0 & \int_0^t e^{-\lambda_x t} dF(t) & T & 0 \\ \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt & \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & 0 & \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) & 0 & 0 \\ 1(t_{пз}+t_{рск}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1(t_{аск}) & 0 & 0 & 1(t_{аск}) & 0 & 0 & 0 \\ 1(t_{в}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1(t_{аск}) & 0 & 0 & 1(t_{аск}) \\ 0 & 0 & 0 & 1(t_{рск}) & 0 & 0 & 1(t_{пз}+t_{рск}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\int_0^t e^{-\lambda_{пр} t} dt}{\int_0^T e^{-\lambda_{пр} t} dt} & T & 0 \end{vmatrix} \quad (3)$$

У матриці (3) використані такі позначення:

$t_{пз}$ – тривалість виконання профілактичних заходів (ТО) СПСО;

$t_{рск}$ – тривалість контролю СПСО РСК;

$t_{аск}$ – тривалість контролю СПСО АСК;

$t_{в}$ – тривалість повного відновлення СПСО.

З урахуванням функції Лапласа, функція розподілу часу напрацювання СПСО на відмову для DN - розподілу має такий вигляд:

$$F(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu\cdot t}}\right) + e^{2\cdot v^2} \cdot \Phi\left(-\frac{t+\mu}{v\sqrt{\mu\cdot t}}\right) \quad (4)$$

де μ – параметр масштабу; v – параметр форми.

Середній час перебування СПСО справною у стані S_1 :

$$\varphi_{s_1}(T) = M\{\min(\tau, \tau_x)\} \quad \Delta(t) = 1 - e^{-\lambda_x t}$$

$$\varphi_{s_1}(T) = \int_0^T (1-F(t)) \cdot (1-\Delta(t)) dt$$

$$F_{ij}(T) = \left| \begin{array}{c} P_{12}(T) \cdot T + P_{13}(T) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{13}(t) + P_{15}(T) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{15}(t) + P_{16}(T) \cdot T \\ t_{пз} + t_{рск} \\ t_{аск} \\ t_{в} \\ t_{аск} \\ d_{рск} \cdot t_{рск} + (1-d_{рск}) \cdot (t_{пз} + t_{рск}) \\ \frac{1-e^{-\lambda_{пз} \cdot T}}{\lambda_{пз}} \end{array} \right| \quad (6)$$

Значення стаціонарних ймовірностей вкладеного ланцюга Маркова знаходяться як рішення системи з алгебраїчних рівнянь:

$$\pi(T)_i = \sum_{j=1}^N (\pi(T)_j \cdot P(T)_{ji})$$

Таким чином, система рівнянь у матричному вигляді буде:

$$\pi(T) = \left| \begin{array}{c} \pi(T)_2 + \pi(T)_3 \cdot d_{аск}^{cc} + \pi(T)_4 \\ \pi(T)_1 \cdot [(1-F(T))e^{-\lambda_x T}] \\ \pi(T)_1 \cdot \left[\lambda_x \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt \right] \\ \pi(T)_3 \cdot (1-d_{аск}^{cc}) + \pi(T)_5 \cdot d_{аск} + \pi(T)_6 \cdot d_{рск} \\ \pi(T)_1 \cdot \left(\rho \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) \right) + \pi(T)_7 \cdot (1-e^{-\lambda_{пз} T}) \\ \pi(T)_1 \cdot \left((1-\rho) \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t) \right) + \pi(T)_7 \cdot e^{-\lambda_{пз} T} \\ \pi(T)_5 \cdot (1-d_{аск}) + \pi(T)_6 \cdot (1-d_{рск}) \end{array} \right|$$

із умовою нормування:

$$\sum_{i=1}^N \pi_i = 1$$

Для спрощення запису введено позначення:

$$\begin{aligned} c_1(T) &= (1-F(T))e^{-\lambda_x T}; \\ c_2(T) &= (1-\rho) \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t); \\ c_3(T) &= \lambda_x \int_0^T e^{-\lambda_x t} (1-F(t)) dt; \\ c_4(T) &= \rho \int_0^T e^{-\lambda_x t} dF(t); \\ c_5(T) &= 1 - e^{-\lambda_{пз} T}; \end{aligned}$$

або

$$\varphi_{s_1}(T) = \int_0^T (1-F(t)) \cdot e^{-\lambda_x t} dt \quad (5)$$

Решта $\varphi_i(t)$ для $i=2,3,\dots,7$ дорівнюють нулю, так як СПСО в цих станах в повній мірі не використовується або перебуває в несправному стані.

Розрахунок матриці середніх тривалостей перебування в станах напівмарковського процесу має вигляд:

$$c_6(T) = e^{-\lambda_{пз} T}$$

Тоді матриця запишеться так:

$$\pi(T) = \left| \begin{array}{c} \pi(T)_2 + \pi(T)_3 \cdot d_{аск}^{cc} + \pi(T)_4 \\ \pi(T)_1 \cdot c_1(T) \\ \pi(T)_1 \cdot c_3(T) \\ \pi(T)_3 \cdot (1-d_{аск}^{cc}) + \pi(T)_5 \cdot d_{аск} + \pi(T)_6 \cdot d_{рск} \\ \pi(T)_1 \cdot c_4(T) + \pi(T)_7 \cdot c_5(T) \\ \pi(T)_1 \cdot c_2(T) + \pi(T)_7 \cdot c_6(T) \\ \pi(T)_5 \cdot (1-d_{аск}) + \pi(T)_6 \cdot (1-d_{рск}) \end{array} \right| \quad (7)$$

із умовою нормування:

$$\pi(T)_1 + \pi(T)_2 + \pi(T)_3 + \pi(T)_4 + \pi(T)_5 + \pi(T)_6 + \pi(T)_7 = 1$$

Знайдемо залежності π_1 від π_7 та π_7 від π_1 та запишемо кінцеві вирази для π_1 та π_7 :

$$\pi_1 = [c_6 \cdot d_{рск} + c_5 \cdot d_{аск}^{cc}] / [1 - c_1 - c_3 + c_5 + c_6 - c_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot c_6 - c_3 \cdot c_5 - c_3 \cdot c_6 - c_2 \cdot d_{рск} + 2 \cdot c_6 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск} + 2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_2 \cdot c_5 \cdot d_{рск} + c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_4 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_4 \cdot c_6 \cdot d_{аск} - c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} \cdot d_{аск}^{cc} - c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} \cdot d_{аск}^{cc}];$$

$$\pi_7 = [1 - c_1 - c_3 - c_2 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск}] / [1 - c_1 - c_3 + c_5 + c_6 - c_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot c_6 - c_3 \cdot c_5 - c_3 \cdot c_6 - c_2 \cdot d_{рск} + 2 \cdot c_6 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск} + 2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_2 \cdot c_5 \cdot d_{рск} + c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_4 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} + c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_4 \cdot c_6 \cdot d_{аск} - c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} \cdot d_{аск}^{cc} - c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} \cdot d_{аск}^{cc}].$$

Для спрощення введемо додаткові позначення:

$$A = c_6 \cdot d_{рск} + c_5 \cdot d_{аск}^{cc};$$

$$B = 1 - c_1 - c_3 + c_5 + c_6 - c_1 \cdot c_5 - c_1 \cdot c_6 - c_3 \cdot c_5 - c_3 \cdot c_6 - c_2 \cdot d_{рск} + 2 \cdot c_6 \cdot d_{рск} - c_4 \cdot d_{аск} + 2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_2 \cdot c_5 \cdot d_{рск} + c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_4 \cdot c_6 \cdot d_{рск} + c_2 \cdot c_5 \cdot d_{аск} + c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} - c_4 \cdot c_6 \cdot d_{аск} - c_3 \cdot c_6 \cdot d_{рск} \cdot d_{аск}^{cc} - c_3 \cdot c_5 \cdot d_{аск} \cdot d_{аск}^{cc}.$$

Тоді:

$$\pi_1 = \frac{A}{B}$$

$$\pi_7 = \frac{1-c_1-c_3-c_2 \cdot d_{\text{рск}} - c_4 \cdot d_{\text{аск}}}{B}$$

Підставляючи знайдені вирази для π_1 та π_7 в систему рівнянь (7), отримаємо кінцеве рішення:

$$\pi(T) = \begin{pmatrix} \frac{A(T)}{B(T)} \\ c_1(T) \cdot \frac{A(T)}{B(T)} \\ c_3(T) \cdot \frac{A(T)}{B(T)} \\ \pi(T)_3 \cdot (1-d_{\text{аск}}) + \pi(T)_5 \cdot d_{\text{аск}} + \pi(T)_6 \cdot d_{\text{рск}} \\ c_4(T) \cdot \frac{A(T)}{B(T)} + c_5(T) \cdot \pi(T)_7 \\ \pi(T)_1 \cdot c_2(T) + \pi(T)_7 \cdot c_6(T) \\ \pi(T)_5 \cdot (1-d_{\text{аск}}) + \pi(T)_6 \cdot (1-d_{\text{рск}}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Після підстановки у рівняння (1) значення $\varphi_{s_1}(T)$, $\eta(T)$ та $\pi(T)$ із формул (5), (6) та (8),

застосувавши при цьому вираз (4) для функції розподілу часу напрацювання СПСО на відмову для DN-розподілу, розраховується $K_{\text{ТВ}}$ для запропонованої математичної моделі експлуатування СПСО.

Обговорення

В рамках виконання завдання з підвищення надійності СПСО на військових об'єктах шляхом визначення оптимальної періодичності їх ТО, розроблено математичну модель експлуатування СПСО з використанням DN-розподілу наробітку на відмову, яка дозволяє розрахувати найвище значення $K_{\text{ТВ}}$, що відповідає оптимальній періодичності проведення ТО СПСО.

Отримані результати дозволяють графічно відобразити залежності значення $K_{\text{ТВ}}$ від параметрів математичної моделі експлуатування СПСО. При проведенні розрахунків значень функції DN-розподілу наробітку СПСО на відмову використано функцію Лапласа (рис. 4).

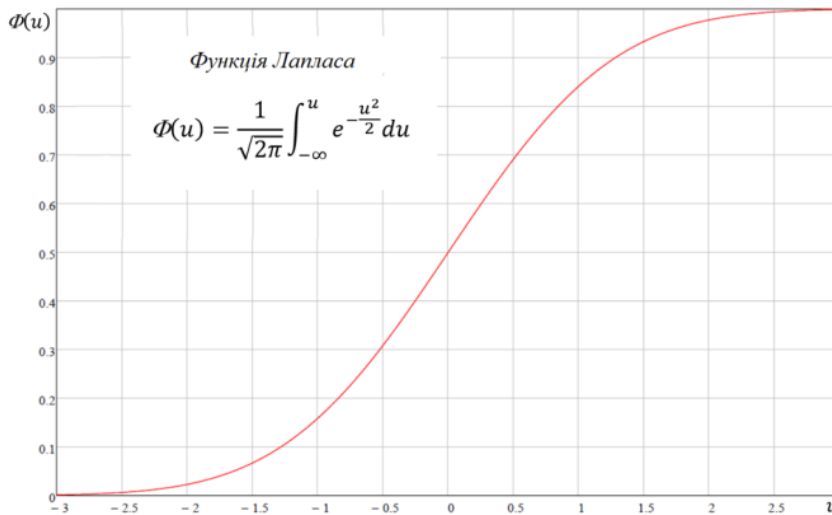


Рисунок 4. Вигляд функції Лапласа $\Phi(u)$, що використовується при розрахунку значень функції DN-розподілу наробітку СПСО на відмову

На рис. 5 наведено вигляд функції DN-розподілу $F(t)$, що використовується для моделювання наробітку СПСО на відмову при параметрі форми $v = 0,75$ (згідно [24]), різних значеннях параметру

масштабу μ та різних часових показниках, що відповідають періодичності проведення профілактичних заходів (ТО) та перевірки технічного стану СПСО РСК.

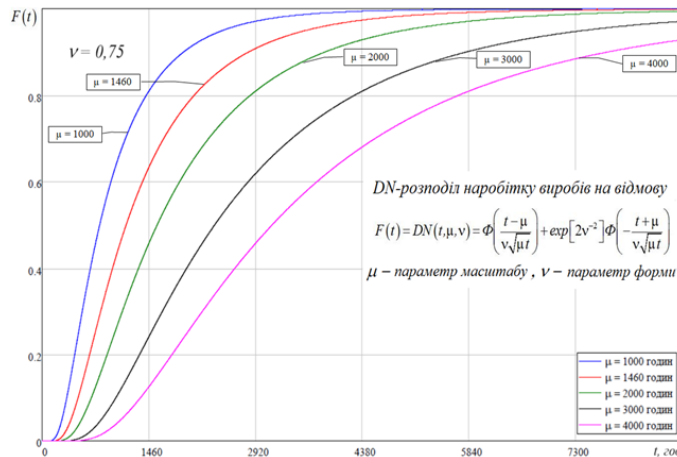


Рисунок 5. Вигляд функції DN-розподілу $F(t)$, що використовується для моделювання наробітку СПСО на відмову

При цьому вигляд щільності ймовірності DN -розподілу $f(t)$ (рис. 6) вказує на більше її значення при меншому проміжку часу між відмовами.

Тобто при зниженні рівня надійності СПСО щільність розподілу сягатиме більшого значення.

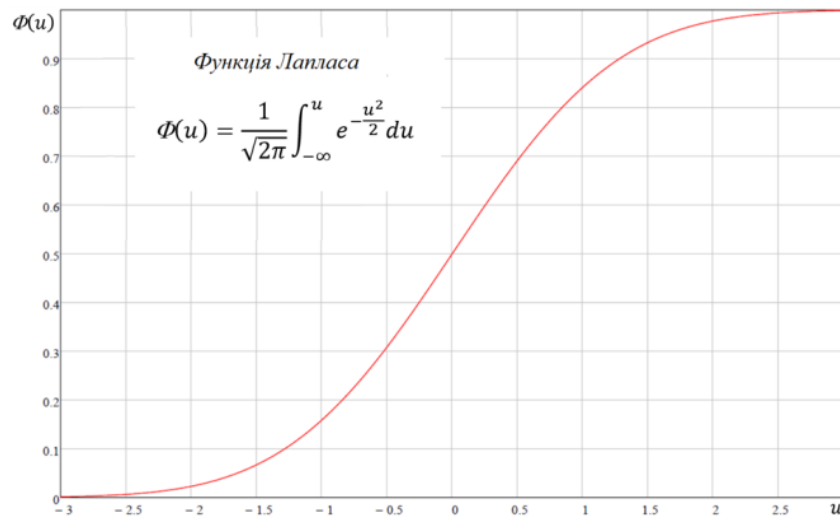


Рисунок 6. Вигляд щільності ймовірності DN -розподілу $f(t)$, що використовується для моделювання наробітку СПСО на відмову

Висновки

Результати розрахунків, у тому числі ті, що отримані графо-аналітичним методом, відповідають фізичному змісту та свідчать про адекватність математичної моделі експлуатування СПСО. Ці результати ляжуть в основу методики підвищення ефективності експлуатування СПСО за рахунок визначення оптимальної періодичності проведення їх ТО. Проведення ТО СПСО з оптимальною періодичністю сприятиме підвищенню надійності цих систем, що в довгостроковій перспективі підвищить рівень захисту військових об'єктів від виникнення НСТХ.

Список використаних джерел

- Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури: Постанова Кабінету Міністрів України від 09.10.2020 р. № 1109. Офіційний вісник України. 2020. № 93. С. 9.
- Авраменко О.В., Іванов В.І., Сарапін Ю.О., Федоров О.В. Підвищення ефективності захисту об'єктів зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження) від виникнення надзвичайних ситуацій шляхом удосконалення умов зберігання. Науково-практичний журнал "Повітряна міць України". Київ: НУОУ. 2023. № 2 (5). С. 51-56.
- Аветисян В.Г., Сенчихін Ю.М. Обґрунтування вихідних даних для розрахунку сил та засобів пожежогасіння на об'єктах з наявністю боєприпасів та вибухових речовин. Збірник наукових праць "Проблеми надзвичайних ситуацій". Харків: НУЦЗУ. 2018. № 27. С. 3-9.
- Убайдуллаєв Ю.Н., Гаврилюк А.О., Полтораченко А.І. Моделювання розвитку надзвичайної ситуації на арсеналах, базах, складах зберігання боєприпасів. Збірник наукових праць "Управління розвитком складних систем". Київ: КНУБА. 2019. № 37. С. 60-65.
- Про затвердження Переліку об'єктів Міністерства оборони України та Збройних Сил України, які підлягають обладнанню системами протипожежного захисту: наказ Міністерства оборони України від 21.12.2017 р. № 690.

6. Авраменко О.В., Поліщук В.В., Сарапін Ю.О. Підвищення ефективності захисту об'єктів зберігання боєприпасів від надзвичайних ситуацій шляхом впровадження обґрунтованої періодичності технічного обслуговування систем протипожежного захисту. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 21-22 берез. 2023 р. Київ, 2023. С. 10-13.

7. Іванов В.І., Сарапін Ю.О. Підвищення живучості об'єктів зберігання авіаційних засобів ураження шляхом впровадження обґрунтованої періодичності технічного обслуговування систем протипожежного захисту. Новітні технології – для захисту повітряного простору: зб. тез доп. XIX міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квіт. 2023 р. Харків, 2023. С. 382-383.

8. Дуленко Д.І., Сарапін Ю.О. Підвищення рівня цивільної безпеки на об'єктах зберігання боєприпасів. Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки: зб. тез доп. III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 29 квіт. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 41.

9. Авраменко О.В., Сарапін Ю.О., Яблонський П.М. Підвищення ефективності експлуатації систем пожежної сигналізації та оповіщення шляхом визначення оптимальної періодичності їх технічного обслуговування. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 28-30 трав. 2024 р. Київ, 2024. С. 177-179.

10. Важинський С.Е., Федюк І.Б., Чернуха А.М. Вдосконалення протипожежного захисту місць зберігання боєприпасів та вибухових речовин. Збірка наукових праць. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ. 2021. № 1 (33). С. 278-289.

11. Савченко О.В., Стецюк Є.І., Островерх О.О., Іванець Г.В. Обґрунтування використання гелеутворюючих систем для запобігання надзвичайних ситуацій на складах зберігання артилерійських боєприпасів. Збірка наукових праць. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ. 2015. № 22.

12. Жартовський С.В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об'єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із

целюлозовмісних матеріалів. Науковий вісник НЛТУ. Львів: НЛТУ. 2017. № 10. С. 101–105.

13. Yadav V., Mulani A., Deshmene D., Kalburgi B. 360 Degree Rotating Fire Protection System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol. 3. No 12. P. 133–138.

14. Suralaga F.A., Sari N., Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No 1. P. 143–155.

15. Wang Y., Tan H. Design and implementation of a distributed fire monitoring and alarm system based on LoRa. Journal of Physics:Conference Series. 2023. No 2674.

16. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penyebab terjadi false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknika. 2024. Vol. 9. No 1. P.79–88.

17. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No 57. P. 2036–2040.

18. Pietrzak M., Chmiel M., Feltynowski M. Analysis of the Problem of False Fire Alarms Generated by Fire Alarm Systems in Poland and Other Selected Countries. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 118–132.

19. Marzec M., Kuskowski J. False Alarms in the Decision Support System of the State Fire Service. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No 2. P. 134–145.

20. Terletsyky T., Kaidyk O., Tkachuk A., Zabolotnyi O., Caganova D. Ensuring the reliability of functioning of non-addressed fire alarm. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2021. Vol. 9. No 37.

21. ДСТУ 3433-96:1996. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ: Інститут проблем надійності машин і споруд, 1996. 42 с.

22. ДСТУ 9047:2020. Системи протипожежного захисту. Настанова з підтримання експлуатаційної придатності. [Чинний від 2021-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2020. 42 с.

23. ДСТУ 2860-94:1994. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Інститут проблем надійності машин і споруд, 1994. 34 с.

24. ДСТУ 2862-94:1994. Методи розрахунку показників надійності. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1994. 39 с.

¹**Oleksandr Avramenko** (Doctor of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0003-1358-1185>

¹**Yurii Sarapin**

<https://orcid.org/0000-0003-2893-4975>

¹**Petro Yablonskyi** (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-2651-4299>

²**Oleksiy Fedorov**

<https://orcid.org/0000-0002-0905-027X>

¹*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

²*Ivan Kozhedub National Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

DETERMINATION OF THE OPTIMUM PERIODICITY OF MAINTENANCE OF THE FIRE ALARM SYSTEM AND NOTIFICATION AT MILITARY STORAGE FACILITIES OF AMMUNITION (AVIATION ATTACK MEANS)

The work examines the topical issue of increasing the reliability of fire alarm and warning systems (FALS) at ammunition storage facilities (aviation weapons). Using a semi-Markov random process, a mathematical model of the operation of FALS was built, analytical calculations of the average time the system is in a working condition, in any condition, and the frequency of the random process entering different states, which allows to find the value of the coefficient of technical use, taking into account various operating parameters of FALS.

The proposed method of mathematical modeling involves the application of the diffusion non-monotonic law of distribution of the time of stay of FALS in the states of the model. Based on the obtained analytical dependencies, it is possible to find the maximum value of the coefficient of technical use, which will correspond to the optimal frequency of maintenance of FALS.

The results obtained in the work can be used to develop a methodology for increasing the efficiency of FALS operation by determining the optimal periodicity of their maintenance, which will contribute to increasing the reliability of FALS at military storage facilities for ammunition (aviation weapons) and, in the long term, will improve the level of protection of these facilities objects from the occurrence of man-made emergency situations.

Keywords: *emergency situation; threat; risk; prevention; refusal; maintenance; mathematical model; distribution law.*

References

1. Some issues of critical infrastructure facilities: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 9, 2020 No. 1109. Official Gazette of Ukraine. 2020. No. 93. P. 9.

2. Avramenko O.V., Ivanov V.I., Sarapin Yu.O., Fedorov O.V. Increasing the effectiveness of the protection of ammunition storage facilities (aviation weapons) against

emergency situations by improving storage conditions. Scientific and practical journal “Air Power of Ukraine”. Kyiv: NUOU. 2023. No. 2 (5). P. 51-56.

3. Avetisyan V.G., Senchikhin Yu.M. Justification of the initial data for the calculation of forces and means of fire extinguishing at objects with the presence of ammunition and explosives. Collection of scientific works “Problems of emergency situations”. Kharkiv: NUTSZU. 2018. No. 27. P. 3–9.

4. Ubaidullaev Y.N., Gavriyuk A.O., Poltorachenko A.I. Modeling the development of an emergency situation at arsenals, bases, ammunition storage warehouses. Collection of scientific works "Management of development of complex systems". Kyiv: KNUBA. 2019. No. 37. P. 60–65.
5. On approval of the List of objects of the Ministry of Defense of Ukraine and the Armed Forces of Ukraine that are subject to being equipped with fire protection systems: order of the Ministry of Defense of Ukraine dated 21.12.2017. No. 690.
6. Avramenko O.V., Polishchuk V.V., Sarapin Yu.O. Increasing the effectiveness of the protection of ammunition storage facilities against emergency situations by implementing reasonable periodicity of technical maintenance of fire protection systems. Challenges and threats to critical infrastructure. Collective monograph: coll. theses add. international science and practice conference, Kyiv, March 21–22, 2023. Kyiv, 2023. P. 10–13.
7. Ivanov V.I., Sarapin Yu.O. Increasing the survivability of aviation weapons storage facilities by implementing reasonable periodicity of maintenance of fire protection systems. The latest technologies – for the protection of air space: coll. theses add. XIX International of science conference, Kharkiv, April 12–13, 2023. Kharkiv, 2023. P. 382–383.
8. Dulenko D.I., Sarapin Yu.O. Increasing the level of civil security at ammunition storage facilities. Modern problems of professional and civil safety: coll. theses add. III International science and practice internet conference, Dnipro, April 29, 2024. Dnipro, 2024. P. 41.
9. Avramenko O.V., Sarapin Yu.O., Yablonskyi P.M. Increasing the efficiency of operation of fire alarm and notification systems by determining the optimal periodicity of their maintenance. Actual problems and innovative technologies in the field of civil defense and environmental security for the post-war recovery of Ukraine: coll. of science works of international science and practice conference, Kyiv, May 28–30, 2024. Kyiv, 2024. P. 177–179.
10. Vazhynskyi S.E., Fedyuk I.B., Chernukha A.M. Improvement of fire protection of storage places of ammunition and explosives. Collection of scientific papers. Problems of emergency situations. Kharkiv: NUTSZU. 2021. No. 1 (33). P. 278–289.
11. Savchenko O.V., Stetsyuk E.I., Ostroverkh O.O., Ivanets G.V. Justification of the use of gel-forming systems to prevent emergency situations in artillery ammunition storage warehouses. Collection of scientific papers. Problems of emergency situations. Kharkiv: NUTSZU. 2015. No. 22.
12. Zhartovsky S.V. Problematic issues of creating a fire protection system of a critical infrastructure object with a fire load made of cellulose-containing materials. Scientific Bulletin of NLTU. Lviv: NLTU. 2017. No. 10. P. 101–105.
13. Yadav V., Mulani A., Deshmane D., Kalburgi B. 360 Degree Rotating Fire Protection System. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2023. Vol. 3. No. 12. P. 133–138.
14. Suralaga F.A., Sari N., Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No. 1. P. 143–155.
15. Wang Y., Tan H. Design and implementation of a distributed fire monitoring and alarm system based on LoRa. Journal of Physics: Conference Series. 2023. No. 2674.
16. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penebaya peridahan false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknika. 2024. Vol. 9. No. 1. P. 79–88.
17. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No. 57. P. 2036–2040.
18. Pietrzak M., Chmiel M., Feltynowski M. Analysis of the Problem of False Fire Alarms Generated by Fire Alarm Systems in Poland and Other Selected Countries. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No. 2. P. 118–132.
19. Marzec M., Kuskowski J. False Alarms in the Decision Support System of the State Fire Service. Safety and fire technology. 2022. Vol. 60. No. 2. P. 134–145.
20. Terletsykyi T., Kaidyk O., Tkachuk A., Zabolotnyi O., Caganova D. Ensuring the reliability of functioning of non-addressed fire alarm. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2021. Vol. 9. No. 37.
21. DSTU 3433-96:1996. Reliability of equipment. Failure models. Basic provisions. [Effective from 1999-01-01]. View. officer Kyiv: Institute of reliability problems of machines and structures, 1996. 42 p.
22. DSTU 9047:2020. Fire protection systems. Instruction on maintenance of operational suitability. [Effective from 2021-01-01]. View. officer Kyiv: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2020. 42 p.
23. DSTU 2860-94:1994. Reliability of equipment. Terms and definitions. [Effective from 1996-01-01]. View. officer Kyiv: Institute of Reliability Problems of Machines and Structures, 1994. 34 p.
24. DSTU 2862-94:1994. Methods of calculating reliability indicators. [Effective from 1996-01-01]. View. officer Kyiv: Derzhspozhivstandard of Ukraine, 1994. 39 p.