

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-108-114

УДК 623.48 (477)

¹Авраменко Олександр Васильович (доктор технічних наук, доцент)

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

¹Сарапін Юрій Олександрович

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

¹Яблонський Петро Михайлович (кандидат технічних наук, доцент)

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

²Федоров Олексій Валерійович

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

¹Національний університет оборони України, Київ, Україна

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

ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТУВАННЯ СИСТЕМ ПОЖЕЖНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ОПОВІЩУВАННЯ НА ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ АВІАЦІЙНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ

Забезпечення безперервного функціонування систем пожежної сигналізації та оповіщення на об'єктах зберігання авіаційних засобів ураження розглядається як один із ключових елементів комплексу превентивних заходів, спрямованих на недопущення розвитку пожежі до рівня надзвичайних ситуацій. Підвищені вимоги до надійності зазначених систем зумовлюють необхідність пошуку нових, науково обґрунтованих підходів до оцінювання їх ефективності та підвищення ймовірності безвідмовної роботи.

У статті обґрунтовано підходи до оцінювання ефективності експлуатування систем пожежної сигналізації та оповіщення, які спрямовані на оптимізацію періодичності проведення їх технічного обслуговування. Використання запропонованих підходів дає змогу максимізувати значення показника надійності цих систем, мінімізувати фінансово-економічні витрати, пов'язані із їх утриманням, або досягти оптимального балансу між мінімальними витратами та гранично допустимим рівнем надійності системи.

Застосування розроблених методичних підходів до оцінки показників ефективності систем пожежної сигналізації та оповіщення у подальшому дозволить здійснювати більш точні прогнози та формувати обґрунтовані управлінські рішення щодо експлуатування цих систем. У довгостроковій перспективі це сприятиме підвищенню рівня захисту об'єктів зберігання авіаційних засобів ураження від можливих надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: *надзвичайна ситуація; захист; безпека; об'єкти критичної інфраструктури; загроза; ризик; система; модель; ймовірність безвідмовної роботи; статистичні дані; економічна ефективність; вимоги до надійності; показники надійності; оцінка показників надійності; контроль технічного стану; технічне обслуговування.*

Вступ

В основі визначення ефективності технічної системи (ТС) лежить принцип раціонального використання ресурсів, який виражається через відношення отриманого результату до витрат, що були необхідні для його досягнення. Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінювати продуктивність будь-якої ТС, незалежно від її масштабу чи сфери застосування.

Результат – це ключовий параметр ефективності ТС. Результатом роботи ТС може бути різноманітний набір характеристик, залежно від її призначення. Витрати є своєрідним обмежувальним фактором для досягнення максимального рівня продуктивності ТС.

Продуктивність системи пожежної сигналізації та оповіщення (СПСО) визначається її здатністю оперативно виявляти загрозу, точно локалізувати місце займання та ефективно передавати сигнал про

небезпеку.

Зважаючи на критичну роль СПСО як ключового елемента комплексної системи захисту об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ), до них висуваються підвищені вимоги до надійності. Ключова роль СПСО на ОКІ, зокрема, на об'єктах зберігання авіаційних засобів ураження (АЗУ), полягає у забезпеченні раннього виявлення займання (до початку вибухів) для оперативного реагування та мінімізації ризиків, що можуть призвести до виникнення надзвичайної ситуації (НС) та катастрофічних наслідків [1], [2].

Відповідно до [3] під ефективністю розуміється співвідношення між досягненим результатом і використаними ресурсами. Тобто визначення ефективності СПСО полягає у встановленні оптимального співвідношення між результатом та витратами, спрямованими на його отримання. Тому для досягнення високої ефективності СПСО

важливо оптимізувати процес експлуатування, зменшуючи непродуктивні витрати фінансового ресурсу та підвищуючи значення показника надійності – коефіцієнта технічного використання ("К" _тв) СПСО. В цьому контексті оцінка техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО визначається комплексним підходом, що складається з оцінки показника надійності (технічної ефективності) та показника економічної ефективності.

З технічної точки зору ефективність СПСО характеризується їхньою здатністю довготривало працювати у режимі безвідмовної роботи. Це досягається, зокрема, підвищенням ймовірності безвідмовної роботи за рахунок оптимізації періодичності проведення технічного обслуговування (ТО) СПСО [4]. З економічної точки зору оптимальна періодичність проведення ТО цих систем сприятиме зменшенню експлуатаційних витрат, оскільки дозволить уникати непотрібних або надмірно частих ремонтів, з одного боку, і запобігати критичним відмовам, які можуть призвести до НС і значних збитків, з іншого. Тобто під техніко-економічною ефективністю СПСО мається на увазі не лише надійність СПСО, але й здатність досягати максимального результату за мінімально можливих витрат. Ідеальним підходом є баланс між значеннями показників надійності та показників економічної ефективності, що забезпечує необхідний рівень безпеки без надмірного фінансового навантаження.

Проблематика підвищення ефективності експлуатування СПСО становить предмет активного вивчення та ґрунтового аналізу в межах значної кількості наукових досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Зокрема, робота [5] присвячена обґрунтуванню методів оцінювання ефективності функціонування СПСО та характеристики особливостей цих методів. Дослідження [6] акцентує увагу на проблемних питаннях створення протипожежного захисту ОКІ з урахуванням необхідності реагування на початковій стадії розвитку пожежі. У наукових працях [7-10] наголошується на критичній важливості надійності та функціональної стійкості СПСО для гарантування безпеки та мінімізації значних економічних збитків. В роботах [11,12] аналізується проблема низької надійності СПСО у високорозвинених країнах, зокрема, досліджується феномен значної кількості хибних спрацювань, які генеруються цими системами. Дослідження [13] присвячене аналізу та оцінці показників надійності СПСО. При цьому особливу увагу приділено значенню періодичного контролю технічного стану та регламентного ТО систем. Аналіз наукових публікацій [14-16] сфокусованих на проблематиці періодичності технічного обслуговування та контролю технічного стану ТС, свідчить про значну дослідницьку активність у цьому напрямі.

Здійснений аналіз наукових джерел свідчить про актуальність розробки нових підходів до

підвищення ефективності експлуатування СПСО (за рахунок оптимізації періодичності технічного обслуговування) на об'єктах зберігання АЗУ.

Метою статті є розробка методологічних підходів до оптимізації ТО СПСО, спрямованих на підвищення ефективності експлуатування цих систем.

Матеріали та методи

Для реалізації поставленої у статті мети було застосовано комплекс методів дослідження. Зокрема, використано метод теоретичного аналізу з метою оцінювання ефективності функціонування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ та визначення основних завдань їх експлуатування. Метод порівняння застосовано для виявлення подібних і відмінних характеристик між різними типами СПСО, що використовуються на ОКІ, а також для встановлення спільних ознак, властивих усім системам. Індуктивний та дедуктивний підходи були використані у процесі дослідження показників надійності роботи СПСО на об'єктах зберігання АЗУ. Метод формалізації дозволив обґрунтувати оптимальну періодичність проведення ТО СПСО. Засоби математичного моделювання застосовувалися під час розрахунково-теоретичного аналізу впливу ключових параметрів експлуатування СПСО на ймовірність безвідмовної роботи цих систем. Чисельні методи були використані для оцінки показників техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО. Графоаналітичний метод забезпечив побудову наочних графічних залежностей, що відображають взаємозв'язки між ключовими параметрами експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ.

Результати

Запропоновані підходи до оцінювання ефективності експлуатування СПСО базуються на моделі, представленій в роботі [4]. Модель побудовано із застосуванням напівмарковського випадкового процесу та дифузійного немонотонного закону розподілу відмов, з урахуванням семи станів, в яких перебуває СПСО на стадії життєвого циклу експлуатування. Представлена модель дає змогу, використовуючи статистичні дані експлуатування СПСО, розрахувати значення показника надійності (технічної ефективності) СПСО – коефіцієнта технічного використання (K_{me}) за формулою:

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

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

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

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

Показником економічної ефективності експлуатування СПСО пропонується обрати розмір питомих витрат на одиницю часу перебування СПСО у справному стані $C_{1\text{ num}}(T)$.

Фактичне значення $C_{1\text{ num}}(T)$ визначається з урахуванням статистичних даних експлуатування СПСО та матриці витрат Q для семи станів моделі. Елементи головної діагоналі Q_{ii} матриці витрат повинні відображати питомі витрати за одиницю часу перебування у відповідному стані, що не залежать від кількості або періодичності заходів, а лише від самого стану, та мають розмірність грн/рік. Недіагональні елементи Q_{ij} матриці витрат можуть бути не нульові тільки ті, що відповідають наявним (можливим) напрямкам переходів між станами моделі експлуатування СПСО та мають розмірність грн. Тобто недіагональні елементи відповідають вартості за один перехід СПСО від одного стану до іншого.

Матриця витрат на експлуатування СПСО матиме вигляд:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & 0 & Q_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & 0 & Q_{33} & Q_{34} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{54} & Q_{55} & 0 & Q_{57} \\ 0 & 0 & 0 & Q_{64} & 0 & Q_{66} & Q_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{77} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Витрати на перебування та вихід СПСО зі станів розраховуються за формулою:

$$C(T) = Q_{ii} \cdot \eta_i(T) + \sum_{j=1}^7 (\pi_j(T) \cdot Q_{ij}) \quad (3)$$

На підставі матриці (2) та формули (3) можливо визначити значення $C_{1\text{ num}}(T)$ за формулою:

$$C_{1\text{ num}}(T) = \frac{C_{\text{num\textit{ сep}}}(T) \cdot \eta_{\text{сep}}(T)}{\pi_i(T) \cdot \eta_i(T)} \quad (4)$$

де $C_{\text{num\textit{ сep}}}(T)$ – середні питомі витрати (загальні) за одиницю календарного часу експлуатування СПСО, грн/год;

$\eta_{\text{сep}}(T)$ – середній час одного переходу НМП.

Для проведення розрахунків значення $C_{1\text{ num}}(T)$ необхідно розрахувати $C_{\text{num\textit{ сep}}}(T)$ за формулою:

$$C_{\text{num\textit{ сep}}}(T) = \frac{\sum_{i=1}^7 (C_i(T) \cdot \pi_i(T))}{\eta_{\text{сep}}(T)},$$

де $\eta_{\text{сep}}(T) = \sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot \eta_i(T)$.

При цьому, значення $\pi_i(T)$ визначається за формулою:

$$\pi_i(T) = \sum_{j=1}^7 (\pi_j(T) \cdot P_{ij}(T)),$$

а значення $\eta_i(T)$ за формулою:

$$\eta_i(T) = \sum_{j=1}^7 P_{ij}(T) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{ij}(t).$$

Таким чином, за результатами проведених досліджень, з урахуванням статистичних даних та реальних умов експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, можливо визначити фактичні значення показника надійності (технічної ефективності) СПСО – коефіцієнта технічного використання $K_{me}(T)$ за формулою (1), та показника економічної ефективності – питомих витрат на одиницю часу перебування СПСО у справному стані $C_{1\text{ num}}(T)$ за формулою (4).

Обговорення

В контексті завдання оптимізації техніко-економічних параметрів експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, базуючись на моделі, представлений в роботі [4], проведено дослідження впливу періодичності ТО цих систем на різні показники ефективності експлуатування СПСО: за критерієм максимального значення показника надійності (технічної ефективності) СПСО – $K_{me}(T)$, за критерієм мінімального значення показника економічної ефективності – $C_{1\text{ num}}(T)$ та за “змішаним” критерієм (техніко-економічної ефективності), при якому досягається мінімально можливе значення $C_{1\text{ num}}(T)$ при значенні $K_{me}(T)$, не нижче, ніж гранично допустиме. Дослідження проведено на основі статистичних даних експлуатування СПСО. При цьому враховані фіксовані значення параметрів дифузійного немонотонного закону розподілу часу наробітку СПСО на відмову, які становлять: параметр масштабу – 1460 год, параметр форми – 0,75.

Для розрахунку показника надійності (технічної ефективності) СПСО – максимального значення $K_{me}(T)$, знайдено похідну від $K_{me}(T)$ по періодичності проведення ТО СПСО та прирівняно її до нуля. Момент перетину $dK_{me}(T)/dT$ лінії нуля відповідає найвищому значенню $K_{me}(T)$. Результати проведених розрахунків значення показника надійності (технічної ефективності) $K_{me}(T)$ при фіксованих значеннях експлуатаційних параметрів СПСО наведено на рис. 1. Отримані результати демонструють, що максимальне значення $K_{me}(T)$ СПСО дорівнює 0,916 та відповідає оптимальній періодичності T_{opt1} проведення ТО СПСО за критерієм $K_{me}(T) \rightarrow \max$, що становить 1 раз на 771 годину (приблизно 1 раз на місяць).

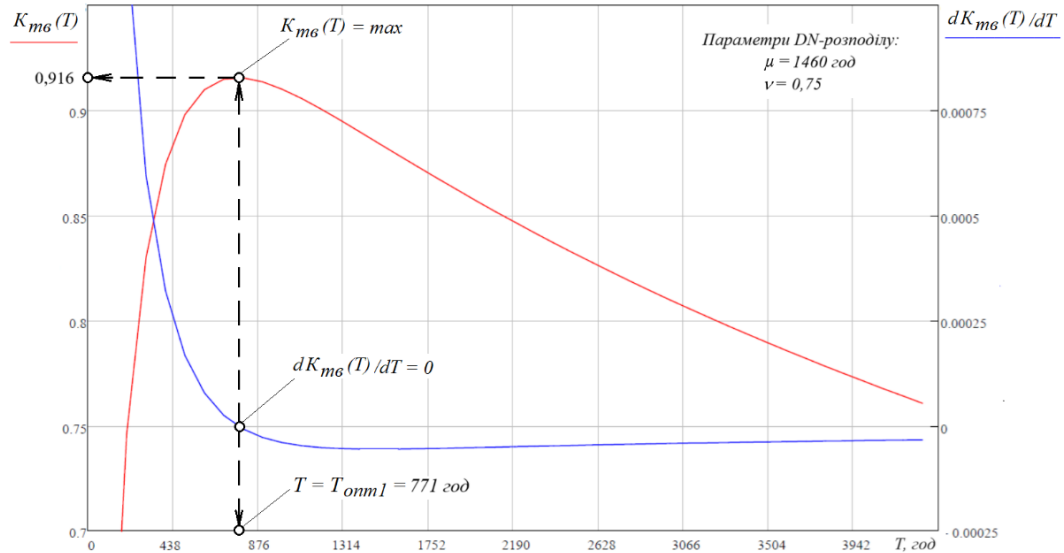


Рисунок 1 – Максимальне значення коефіцієнта технічного використання СПСО

Зазначений підхід до оцінювання ефективності експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ є доречним в умовах підвищених вимог до надійності системи, де пріоритетною метою виступає забезпечення максимального рівня технічної ефективності СПСО, що верифікується величиною показника надійності K_{me} , незважаючи на обсяг фінансових витрат, необхідних для його реалізації.

Для розрахунку показника економічної ефективності СПСО – мінімального значення

$C_{1num}(T)$, знайдено похідну по періодичності проведення ТО СПСО від $C_{1num}(T)$ та прирівняно її до нуля. Момент перетину $dC_{1num}(T)/dT$ лінії нуля відповідає найнижчому значенню $C_{1num}(T)$. Результати проведених розрахунків мінімального значення $C_{1num}(T)$ при фіксованих значеннях експлуатаційних параметрів СПСО наведено на рис. 2.

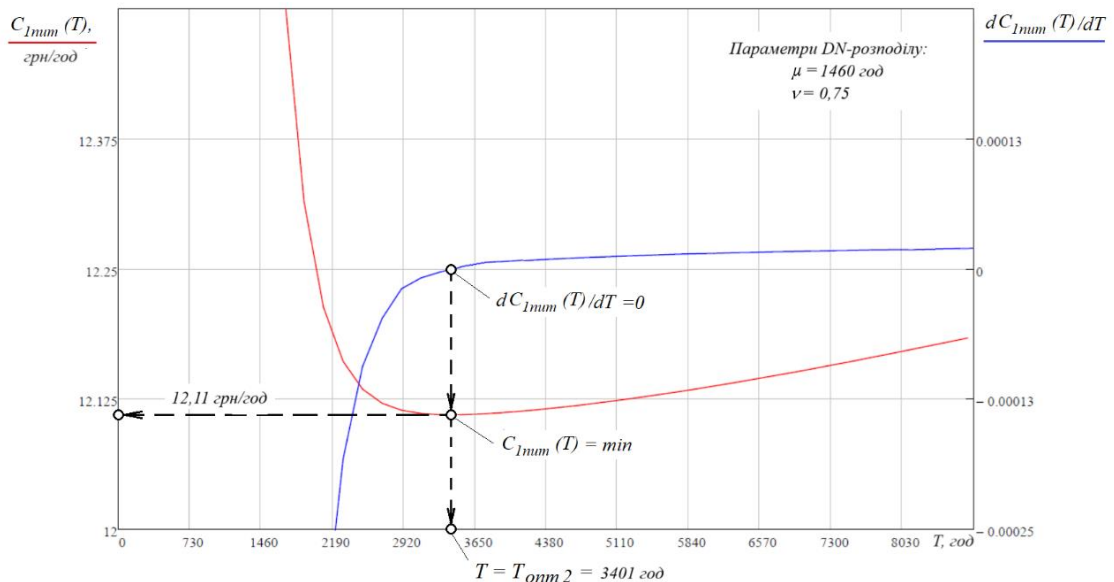


Рисунок 2 – Мінімум значення питомих витрат на одиницю часу перебування СПСО у справному стані

Отримані результати (див. рис. 2) демонструють, що мінімальне значення $C_{1num}(T)$ дорівнює 12,11 грн/год та відповідає оптимальній періодичності T_{opt2} проведення ТО СПСО за критерієм $C_{1num}(T) \rightarrow \min$, що становить 1 раз на 3401 годину (приблизно 1 раз на 4,5 місяці).

Зазначений підхід є обґрунтованим для застосування лише в умовах, коли пріоритетною задачею виступає забезпечення економічної ефективності, а максимальні вимоги до надійності СПСО не висувуються.

Графічне відображення результатів отриманих залежностей $C_{1num}(T)$ та $K_{me}(T)$ від періодичності

проведення ТО СПСО за “змішаним” критерієм оптимізації, що характеризує техніко-економічну ефективність експлуатування СПСО, при

фіксованих експлуатаційних параметрах та різних рівнях надійності СПСО представлено на рис. 3.

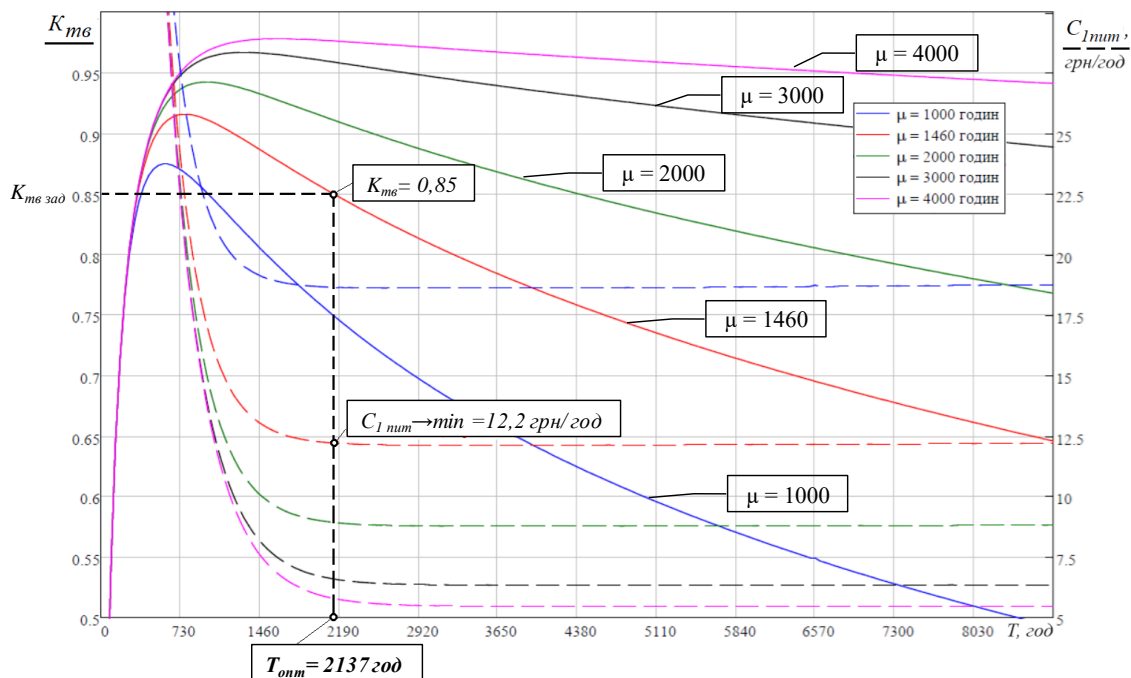


Рисунок 3 – Залежності $C_{1\text{min}}(T)$ та $K_{mt}(T)$ від періодичності проведення ТО за “змішаним” критерієм оптимізації при фіксованих експлуатаційних параметрах та різних рівнях надійності СПСО

Оцінка показників техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО за “змішаним” критерієм, при якому досягається мінімальне значення показника економічної ефективності – $C_{1\text{min}}(T)$ при максимальному значенні показника надійності (технічної ефективності) СПСО – $K_{mt}(T)$ (не нижчому, ніж гранично допустиме значення), свідчить (див. рис. 3), що якщо за заданий, мінімально прийнятний рівень показника надійності СПСО прийняти значення коефіцієнта технічного використання 0,85, то оптимальною є періодичність проведення ТО СПСО один раз на 2137 год (приблизно 1 раз на три місяці).

Даний підхід є цілком обґрунтованим у випадках, коли ключовим є досягнення заданого рівня безпеки за рахунок оптимальної техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО. Використання зазначеного підходу дасть змогу при питомих витратах на одиницю часу перебування СПСО у справному стані $C_{1\text{min}}$, наближених до мінімальних, гарантувати необхідний ступінь технічної ефективності системи, що верифікується підтриманням показника надійності K_{mt} на рівні, який відповідає або перевищує гранично допустиме значення.

Результати, отримані в ході проведених досліджень, створюють міцну емпіричну та теоретичну базу для формування науково обґрунтованих практичних рекомендацій, які можуть бути успішно імплементовані в практичну діяльність військ для підвищення ймовірності безвідмовної роботи СПСО на об'єктах зберігання

АЗУ, що у довгостроковій перспективі сприятиме підвищенню рівня захисту цих об'єктів від виникнення НС.

Висновки

У статті представлено методичні підходи до оцінювання техніко-економічної ефективності експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, що дають змогу комплексно враховувати не лише техніко-експлуатаційні характеристики функціонування систем, але й фінансово-економічні чинники, пов'язані з їх використанням.

Отримані результати можуть бути спрямовані на підвищення ефективності експлуатування СПСО на об'єктах зберігання АЗУ, що сприятиме підвищенню рівня захисту цих об'єктів, зниженню ризику ескаляції пожеж до масштабів НС, а також мінімізації матеріальних втрат і загрози для життя та здоров'я людей.

Список використаних джерел

1. Аветісян 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.
2. Убайдуллаєв Ю.Н., Гаврилук 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.
3. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 45 с.

4. Авраменко О.В., Сарапін Ю.О., Яблонський П.М., Федоров О.В. Визначення оптимальної періодичності технічного обслуговування системи пожежної сигналізації та оповіщення на військових об'єктах зберігання боєприпасів (авіаційних засобів ураження). Науково-практичний журнал "Повітряна міць України". Київ: НУОУ, 2024. № 2 (7). С. 96–105.
5. Несенюк Л.П., Савченко О.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Київ: ІДУ НД ЦЗ, 2022. № 2 (14). С. 134–142.
6. 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.
7. Suralaga F., Sari N, Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No 1. P. 143–155.
8. Anggraeni D., Hamid M. Analisis penyebab terjadi false alarm pada fire alarm system di gedung nusantara I DPR RI. JTe Teknik. 2024. Vol. 9. No 1. P.79–88.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No 57. P. 2036–2040.
14. Авраменко О.В., Опенько П.В., П'явчук О.О., Целіщев Ю.П., Яблонський П.М. Визначення періодичності проведення технічного обслуговування виробів військової техніки, що експлуатуються за технічним станом, з використанням дифузійно-монотонного закону розподілу. The Scientific Heritage. Budapest, Hungary, 2021. Vol. 3, No 66. P. 41–47.
15. П'явчук О.О., Дуленко Д.І., Іванов В.І., Целіщев Ю.П. Оцінювання техніко-економічної ефективності експлуатування авіаційних засобів ураження. Науково-практичний журнал "Повітряна міць України". Київ: НУОУ, 2025. № 1 (8). С. 84–91.
16. V. Lukianchuk, B. Lanetskii, H. Khudov, O. Zvieriev, I. Terebuha, V. Kuprii, K. Borisenko, A. Artemenko, O. Aristarkhov, Y. Kondratenko. Development of the combined method for evaluating and controlling the reliability indicator "probability of failure-free switching" of a radio technical complex. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1. No 9(109). P.6–17.

¹Oleksandr Avramenko (doctor of technical sciences, associate professor)

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

¹Yurii Sarapin

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

¹Petro Yablonskyi (candidate of technical sciences, associate professor)

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

²Oleksii Fedorov

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

¹The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Ivan Kozhedub National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

APPROACHES TO ASSESSING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF FIRE ALARM AND NOTIFICATION SYSTEMS AT AVIATION EQUIPMENT STORAGE FACILITIES

Ensuring the continuous functioning of fire alarm and notification systems at aircraft weapons storage facilities is considered one of the key elements of a set of preventive measures aimed at preventing fires from developing to the level of emergencies. Increased requirements for the reliability of these systems necessitate the search for new, scientifically based approaches to assessing their effectiveness and increasing the probability of failure-free operation.

The article substantiates approaches to assessing the efficiency of fire alarm and notification systems, which are aimed at optimizing the frequency of their maintenance. The use of the proposed approaches allows you to maximize the value of the reliability indicator of these systems, minimize the financial and economic costs associated with their maintenance, or achieve the optimal balance between minimum costs and the maximum permissible level of system reliability.

The application of the developed methodological approaches to assessing the effectiveness of fire alarm and notification systems will allow for more accurate forecasts and informed management decisions regarding the operation of these systems. In the long term, this will contribute to increasing the level of protection of aircraft weapons storage facilities from possible emergencies.

Keywords: emergency; protection; safety; critical infrastructure facilities; threat; risk; system; model; probability of failure-free operation; statistical data; economic efficiency; reliability requirements; reliability indicators; evaluation of reliability indicators; technical condition monitoring; maintenance.

References

1. Avetisian V.H., Senchykhin Yu.M. Obgruntuvannia vykhidnykh danykh dlia rozrakhunku syl ta zasobiv pozhezhohasinnia na ob'iektakh z naiavnistiu boieprypasiv ta vybukhovyykh rehovyn. Zbirnyk naukovykh prats "Problemy nadzvychainykh sytuatsii". Kharkiv: NUTsZU. 2018. No 27. S. 3–9.
2. Ubaidullaev Yu.N., Havryliuk A.O., Poltorachenko A.I. Modeliuvannia rozvytku nadzvychainoi sytuatsii na arsenalakh, bazakh, skladakh zberihannia boieprypasiv. Zbirnyk naukovykh prats "Upravlinnia rozvytkom skladnykh system". Kyiv: KNUBA. 2019. No 37. S. 60–65.
3. DSTU ISO 9000:2015. Systemy upravlinnia yakistiu. Osnovni polozhennia ta slovnyk terminiv. [Chynnyi vid 2016-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2016. 45 s.
4. Avramenko O.V., Sarapin Yu.O., Yablonskyi P.M., Fedorov O.V. Vyznachennia optymalnoi periodychnosti tekhnichnoho obsluhovuvannia systemy pozhezhnoi syhnalizatsii ta opovischuvannia na viiskovykh ob'iektakh zberihannia boieprypasiv (aviatsiinykh zasobiv urazhennia). Naukovo-praktychnyi zhurnal "Povitriana mits Ukrainy". Kyiv: NUOU, 2024. No 2 (7). S. 96–105.
5. Nesenjuk L.P., Savchenko O.V., Nizhnyk V.V., Nikulin O.F. Metody otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia system protypozhezhnoho zakhystu. Naukovi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. Kyiv: IDU ND TsZ, 2022. No 2 (14). S. 134–142.
6. Zhartovskiy S.V. Problemni pytannia stvorennia systemy protypozhezhnoho zakhystu ob'iektu krytychnoi infrastruktury z pozhezhnoiu navantahoiu iz tselulozovmisnykh materialiv. Naukovi visnyk NLTU. Lviv: NLTU. 2017. No 10. S. 101–105.
7. Suralaga F., Sari N, Nuryani D., Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA. 2024. Vol. 10. No 1. P. 143–155.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Gupta S., Kanwar Sh., Kashyap M. Performance characteristics and assessment of fire alarm system. Materials Today: Proceedings. 2022. No 57. P. 2036–2040.
14. Avramenko O.V., Openko P.V., Piavchuk O.O., Tselishev Yu.P., Yablonskyi P.M. Vyznachennia periodychnosti provedennia tekhnichnoho obsluhovuvannia vyrobiv viiskovoi tekhniki, scho ekspluatuiutsia za tekhnichnym stanom, z vykorystanniam dyfuziino-monotonnoho zakonu rozpodilu. The Scientific Heritage. Budapest, Hungary, 2021. Vol. 3, No 66. S. 41–47.
15. Piavchuk O.O., Dulenko D.I., Ivanov V.I., Tselishev Yu.P. Otsiniuvannia tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti ekspluatuvannia aviatsiinykh zasobiv urazhennia. Naukovo-praktychnyi zhurnal "Povitriana mits Ukrainy". Kyiv: NUOU, 2025. No 1 (8). S. 84–91.
16. V. Lukianchuk, B. Lanetskii, H. Khudov, O. Zvieriev, I. Terebuha, V. Kuprii, K. Borisenko, A. Artemenko, O. Aristarkhov, Y. Kondratenko. Development of the combined method for evaluating and controlling the reliability indicator "probability of failure-free switching" of a radio technical complex. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 1. No 9(109). P.6–17.