

*О.О. П'явчук,
П.М. Яблонський, кандидат технічних наук,
П.В. Опенько, кандидат технічних наук,
В.П. Диптан, кандидат військових наук
(Національний університет оборони України
імені Івана Черняховського, Україна)*

Математична модель експлуатації виробів тривалого зберігання із застосуванням дифузійно-немонотонного закону розподілу їх відмов

У доповіді побудована математична модель експлуатації виробів тривалого зберігання, із застосуванням дифузійно-немонотонного закону розподілу їх відмов. Встановлена залежність коефіцієнту технічного використання від масштабу і форми, періодичності проведення заходів логістичного забезпечення, достовірності контролю, тривалості відновлення виробу, що відмовив.

Сучасний етап функціонування сектору безпеки і оборони України, як і багатьох інших країн світу, характеризується наявністю в складі їх озброєння і військової техніки значної кількості виробів тривалого зберігання, ресурсні показники яких вичерпані або знаходяться на етапі завершення. При цьому переважна більшість з них були розроблені і виготовлені в Радянському Союзі, після розпаду якого їх розробники і виробники виявилися за кордоном, в основному в російській федерації. Як наслідок – авторський нагляд на території України перестав здійснюватися з кінця 1991 року, а система забезпечення справності фактично перестала існувати. Це призвело до того, що деякі вироби поступово вичерпали не тільки гарантійні, а й призначені ресурсні показники (терміни служби, зберігання), внаслідок чого подальша їх експлуатація повинна бути припинена, перш за все, з міркувань безпеки.

Водночас після здійснення широкомасштабної агресії російської федерації в Україну надходить військово-технічна допомога від зарубіжних країн-партнерів, зокрема і виробів, які потребують логістичного забезпечення (зберігання, транспортування, обслуговування та відновлення у разі несправності).

Зазначені обставини потребують вирішення актуального наукового завдання, суть якого полягає в розробленні методики підвищення ефективності логістичного забезпечення виробів тривалого зберігання на стадіях життєвого циклу “використання” та “підтримка” [1], а саме визначення оптимального періоду проведення технічного обслуговування, у яких ресурсні показники вичерпані або знаходяться на етапі завершення. Вирішити це питання пропонується за допомогою побудови математичної моделі експлуатації виробів тривалого зберігання, що відповідає стадіям життєвого циклу “використання” та “підтримка”, застосовуючи при цьому дифузійно-немонотонний закон (ДН) розподілу їх відмов.

У разі, якщо встановлено, що виріб тривалого зберігання включає

елементи, які складаються з виробів електронної техніки (інтегральні мікросхеми, напівпровідникові пристрої, конденсатори тощо), або інші електротехнічні вироби, то для таких об'єктів за модель відмов найбільш відповідає застосування ДН-розподілу [2, 3]. Крім того, ДН-розподіл є єдиною моделлю, яка дозволяє вирішувати практично всі задачі надійності. Дещо вужчий спектр вирішуваних задач мають ДМ-розподіл та експоненціальний розподіл.

Під час зберігання деяких виробів інформація про їх технічний стан не надходить, всю інформацію містить закон розподілу. Таким чином, якщо вдало підібрані параметри ДН-розподілу, то можна побудувати якісну модель експлуатації. Параметрами ДН-розподілу є параметр масштабу (μ) і параметр форми (ν). Вважається, що параметр масштабу співпадає зі середньою швидкістю зміни визначального параметру, а параметр форми практично співпадає з коефіцієнтом варіації цієї швидкості. Для двопараметричного ДН-розподілу математичне очікування називають параметром масштабу, а коефіцієнт форми – параметром форми. На рис. 1 наведене схематичне зображення моделі експлуатації виробу при тривалому зберіганні.

На рис. 1 стрілки показують напрями переходів та тривалості перебування виробу у попередньому стані $i = \overline{1,5}$ перед переходом до наступного стану $j = \overline{1,5}$.

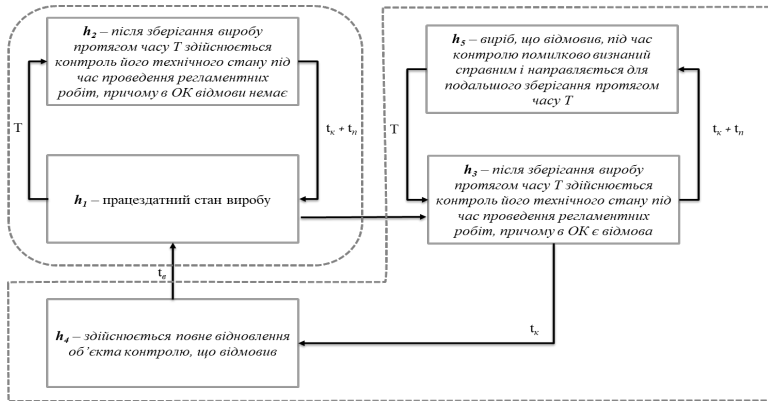


Рис. 1. Схематичне зображення моделі експлуатації виробів тривалого зберігання

На рис. 1 використані наступні позначення:

T – період проведення регламентних робіт;

t_k – тривалість перевірки об'єкту контролю (ОК);

t_n – тривалість проведення профілактичних робіт на ОК;

t_b – тривалість повного відновлення ОК.

Процес експлуатації (зберігання) можна представити випадковим процесом, що відбувається у моделі, як показано на рис. 1. Зручним є

припущення, що у початковий момент часу t_0 виріб знаходиться у справному стані h_1 . Далі починається реалізація випадкової траєкторії його поведінки. Причому, під випадковістю будемо розуміти момент його відмови. Перехід із стану h_i до стану h_j відбувається у відповідності із значеннями матриці переходів $P(T)$.

$$P(T) = \begin{pmatrix} 0 & 1-F(T) & F(T) & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{не} & 1-d_{не} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

де:

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

$d_{не}$ – ймовірність правильного визначення несправного стану виробу.

З (1) випливає, що сума ймовірностей по будь-якому рядку матриці дорівнює одиниці. Крім того, з рис.1 можливо зазначити, що всі стани моделі між собою мають сполучення, тобто поглинаючі стани або стани джерела відсутні. Відсутність нетранзитивних станів є необхідною умовою ергодичності моделі процесу експлуатації виробів. При цьому достатньою умовою ергодичності є скінченність часу перебування у кожному із станів представленої моделі, що забезпечується відповідними чисельними значеннями параметрів законів розподілу перебування у станах моделі та перевіряється під час розрахунків.

Для ДН-розподілу функція розподілу часу безвідмовної роботи має вигляд:

$$F(t) = DN(t, \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \exp[2\nu^{-2}] \Phi\left(-\frac{t + \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right), \quad (2)$$

де:

μ – параметр масштабу;

ν – параметр форми;

$\Phi(x)$ – функція Лапласа: $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$.

Для стаціонарного випадкового процесу можна визначити коефіцієнт технічного використання $K_{ТВ}$ у вигляді [1]:

$$K_{ТВ} = \frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i(T) \cdot \pi_i(T)}{\sum_{i=1}^5 \xi_i(T) \cdot \pi_i(T)} \quad (3)$$

де:

$\omega_i(T)$ – середній час перебування ОК у справних станах;

$\xi_i(T)$ – середній час перебування ОК у будь-яких станах моделі;

$\pi_i(T)$ – частота попадання вкладеного марковського ланцюга до стану h_i , де

$i = \overline{1,5}$.

Частота $\pi_i(T)$ визначається з рівняння :

$$\left. \begin{aligned} \bar{\pi}(T) &= \bar{\pi}(T) \cdot P(T), \\ \sum_{i=1}^5 \pi_i(T) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

У рівнянні (3) через $\bar{\pi}(T)$ позначено вектор, що для представленої моделі містить п'ять компонент, тобто:

$$\bar{\pi}(T) = (\pi_1(T), \pi_2(T), \pi_3(T), \pi_4(T), \pi_5(T))$$

Після підстановки (1) в (4) отримаємо систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_1(T) &= \pi_2(T) + \pi_4(T), \\ \pi_2(T) &= (1 - F(T)) \cdot \pi_1(T), \\ \pi_3(T) &= F(T) \cdot \pi_1(T) + \pi_5(T), \\ \pi_4(T) &= d_{не} \cdot \pi_3(T), \\ \pi_5(T) &= (1 - d_{не}) \cdot \pi_3(T), \\ \sum_{i=1}^5 \pi_i(T) &= 1 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Рішенням системи (5) буде:

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_1(T) &= C \cdot d_{не}, \\ \pi_2(T) &= C \cdot d_{не} (1 - F(T)), \\ \pi_3(T) &= C \cdot F(T), \\ \pi_4(T) &= C \cdot F(T) \cdot d_{не}, \\ \pi_5(T) &= C \cdot (1 - d_{не}) \cdot F(T). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де $C = [2 \cdot d_{не} - d_{не} \cdot F(T) + 2 \cdot F(T)]^{-1}$.

Середній час перебування ОК у справному стані моделі із фізичних міркувань дорівнює:

$$\omega_1(T) = \int_0^T t \cdot dF(t) + T \cdot (1 - F(T)) = \int_0^T [1 - F(t)] dt \quad (7)$$

Решта $\omega_i(T)$ для $i = 2, 3, 4, 5$ дорівнюють нулю, тому що в цих станах ОК не працює, або знаходиться у несправному стані. Середній час перебування ОК у різних станах із фізичних міркувань дорівнює:

$$\begin{aligned} \xi_1(T) &= T, \\ \xi_2(T) &= t_k + t_n; \\ \xi_3(T) &= d_{не} \cdot t_k + (1 - d_{не}) \cdot (t_k + t_n); \\ \xi_4(T) &= t_g; \\ \xi_5(T) &= T. \end{aligned} \quad (8)$$

Після підстановки величин $\omega_1(T)$ з (7), $\pi_i(T)$ з (6) та $\xi_i(T)$ з (8) у (3), отримаємо формулу для коефіцієнта технічного використання:

$$K_{ме} = \frac{d_{не} \cdot \int_0^T (1 - F(t)) dt}{d_{не} T + (1 - F(T)) \cdot d_{не} (t_k + t_n) + F(T) \cdot (t_n - d_{не} \cdot t_n + t_k) + d_{не} \cdot F(T) \cdot t_g + (1 - d_{не}) \cdot F(T) \cdot T} \quad (9)$$

Наступним етапом за формулою (9) буде проведено розрахунки залежності коефіцієнту технічного використання від періодичності проведення ТО при різних значеннях достовірності контролю, параметру форми v та параметру масштабу μ . Для визначення оптимальної періодичності проведення ТО буде взято похідну від виразу (9) по T чисельним методом, що дасть можливість графічно відобразити залежність коефіцієнту технічного використання і похідної від нього.

Висновки

Таким чином, за результатами аналізу існуючого науково-методичного апарату, що використовується фахівцями логістичного забезпечення для оцінювання та контролю показників надійності виробів, проведеного підготовчого етапу дослідження була побудована математична модель експлуатації (зберігання) виробів, що містять електромеханічну основу та зберігаються встановленим порядком, з застосуванням ДН-розподілу на стадіях життєвого циклу “використання” та “підтримка”.

При цьому для опису процесів, що відбуваються у математичній моделі, застосовується напівмарковський випадковий процес, в якості критерію ефективності технічної експлуатації виробів обрано коефіцієнт технічного використання.

Побудована математична модель призначена для використання організаторами розробки, виробництва та фахівцями логістичного забезпечення, який безпосередньо займається застосуванням виробів під час стадій “використання”, “підтримка” для встановлення ефективності зберігання виробів у визначених місцях в умовах відсутності інформації про їх технічний стан.

Напрямами подальшого дослідження є дослідження можливостей щодо проведення модернізації, продовження термінів експлуатації тощо за результатами сумісної роботи виробників (розробників) та фахівців логістичного забезпечення під час проведеної роботи щодо виявлення недоліків, відхилень, дефектів та відмов зазначених виробів військового призначення.

Список літератури

1. Система розроблення і поставлення на виробництво озброєння та військової техніки. Стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки: ДСТУ В-П 15.004:2020. – К.: Держспоживстандарт України, 2020. – 43 с. – (Національний стандарт України).

2. Дыптан В., Опенько П., Яблонський П., П'явчук А. Выбор закона распределения отказов для авиационных средств поражения. The second Karabakh war as a new generation warfare : The proceedings of the international scientific-practical conference, October 21–22, 2021, Baku, Azerbaijan. P. 65-68.

3. Диптан В., Яблонський П., Дуленко Д., Поліщук В., П'явчук О. Обґрунтування застосування дифузійно-немонотонного розподілу у якості моделі відмов авіаційних засобів ураження. Повітряна міць України : Київ, 2021. Вип. 1 (1). С. 70–72.