

А. П. Поляков¹
В. І. Кривцун²
М. М. Каленик²
В. Й. Нагачевський²

ФОРМАЛІЗОВАНЕ ПОДАННЯ ЕКСПОНЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ, ОБМЕЖЕНІСТЬ ЇХНЬОГО ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИН ІНЖЕНЕРНОГО ОЗБРОЄННЯ

¹Винницький національний технічний університет

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

Стаття стосується вирішення науково-прикладної задачі з дослідження можливості застосування існуючих експоненціальних моделей для визначення показників надійності машин інженерного озброєння. Експоненціальні моделі широко застосовуються для оцінки надійності об'єктів, що складаються в основному з радіоелектронних елементів. Це обумовлювало їхнє масове розповсюдження в авіаційній галузі, об'єктах протиповітряної оборони і т. д. Дослідна експлуатація характерних зразків військової дорожньо-будівельної техніки та експериментальні дослідження наробітку основних блоків та вузлів машин інженерного озброєння показують, що інтенсивність відмов та відновлення цих виробів є функціями часу. Такий стан справ пов'язано з особливостями конструкції машин інженерного озброєння, яке відрізняється комплексним застосуванням електричних, механічних, гідравлічних та інших систем, при цьому в ході застосування ці системи часто можуть випробовувати значні перенавантаження. При цьому слід враховувати, що на сьогоднішній день машини інженерного озброєння, які знаходяться в підрозділах, в основному мають термін експлуатації більше гарантованого заводом-виробником, що суттєво впливає на параметри інтенсивності відмов і відновлення. В статті показано порядок отримання виразу для розрахунку основних показників надійності складних технічних систем при експоненціальному розподілі наробітку на відмову і часу їх відновлення та допускається можливість їхнього застосування лише для мінімальних проміжків часу (від кількох годин до кількох днів в залежності від інтенсивності застосування машин) через не ергодичності процесу виникнення відмов та проведення відновлення. Крім цього використання цих моделей повинно супроводжуватися оцінкою адекватності отриманих результатів реальному процесу з коректуванням тривалості відповідних проміжків часу.

Таким чином, побудова математичних моделей технічного стану машин інженерного озброєння буде супроводжуватися пошуком інших концептуальних підходів до визначення показників надійності машин інженерного озброєння та методик для розрахунку цих показників.

Ключові слова: машини інженерного озброєння, експонентні моделі, нестационарний коефіцієнт готовності, показники надійності.

Вступ

Завдяки своїй характеристичній властивості експонентні розподіли і композиції цих розподілів знаходять широке застосування при оцінці надійності технічного стану електронних засобів спостереження, комп'ютерних систем і мереж, а також в інших областях використання військової техніки, головним чином, там, де інтенсивність відмов виробів на порядки нижча інтенсивності відновлення.

У теорії ймовірностей [1,2] показано, що якщо час між виникненням подій розподілено за експонентним законом з параметром ($\lambda = const$) ($\mu = const$), то потік подій є найпростішим потоком, що має властивості ординарності, стаціонарності і відсутності післядії. На таких потоках у теорії надійності виводяться формули показників надійності відновлюваних і невідновлюваних резервованих систем [2]. На цих самих потоках будується більшість систем масового обслуговування.

Однак, механічні, гідравлічні, пневматичні системи мають широке застосування у нашому повсякденному житті та військовій техніці і характеризуються низкою специфічних особливостей, які не дозволяють проводити дослідження їх основних характеристик існуючими методичними підходами, що притаманні для дослідження електричних пристроїв.

Що стосується інженерного озброєння, то досвід проведення випробувань зразків машин інженерного озброєння [3] показав, що складність конструкції цих машин викликає труднощі у розробці методичних підходів до визначення показників їх надійності. Незважаючи на те, що за

результатами обробки результатів статистичних випробувань різних груп машин інженерного озброєння було встановлено [3], що ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відновлення як машин в цілому, так і їх складових підпорядковуються різним законам розподілу запропоновано все ж користуватися експонентними моделями.

Актуальність цього дослідження полягає у необхідності оцінити існуючі підходи до дослідження основних показників надійності складних технічних систем та обґрунтування необхідності розробки методичного апарату визначення основних характеристик надійності машин інженерного озброєння, який би враховував їх конструктивні особливості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В існуючих методичних підходах автори [4, 5] часто намагаються вирішувати практичні завдання щодо оцінки показників надійності складних технічних систем шляхом застосування існуючих «класичних» експонентних моделей, спрощуючи при цьому ті процеси, що відбуваються з технікою у ході її технічної експлуатації шляхом накладання низки обмежень та припущень, хоча це, в свою чергу, може спричинити збільшення похибки в результатах.

Такий підхід міг би бути прийнятним, якби все наполегливіше не поставало питання про повномасштабний перехід до адаптивної системи технічної експлуатації військової техніки, що вимагає детальнішого аналізу процесів зміни її технічного стану.

Мета статті – провести аналіз основних характеристик експонентних моделей для визначення показників надійності складних технічних систем та можливості їх застосування для машин інженерного озброєння, конструкція яких відрізняється комплексним застосуванням електричних, механічних, гідравлічних та інших системи, при цьому в ході застосування ці системи зазнають значних перенавантажень.

Оцінка надійності і відновлюваності виробу

Для оцінки надійності і відновлюваності виробу в цілому його розглянуто у вигляді єдиного первинного елемента. За умови спроможності гіпотези про експонентний розподіл, застосовують такі основні загальновідомі формули [1, 2, 3, 6]:

а) ймовірність безвідмовної роботи виробу за час t

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

б) ймовірність виникнення відмови за час t

$$F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

в) ймовірність відновлення виробу за час τ

$$G(\tau) = 1 - e^{-\mu \tau}, \quad (3)$$

г) ймовірність того, що за час τ відновлення не відбудеться

$$\bar{G}(\tau) = 1 - G(\tau) = e^{-\mu \tau}, \quad (4)$$

д) нестационарний коефіцієнт готовності чи ймовірність того, що відновлюваний виріб у момент часу t буде в працездатному стані за умови, що в початковий момент часу знаходився в працездатному стані

$$K_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right), \quad (5)$$

е) стаціонарний коефіцієнт готовності

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t) = K_r = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (6)$$

ж) нестационарний коефіцієнт оперативної готовності чи умовна ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу t_p за умови, що в момент t ергодичного процесу експлуатації воно буде в працездатному стані

$$K_{or}(t, t_p) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right) e^{-\lambda t_p}, \quad (7)$$

з) стаціонарний коефіцієнт оперативної готовності

$$K_{OG}(t_p) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{OG}(t, t_p) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-\lambda t_p} \quad (8)$$

Формули (1–8) відомі і показані в багатьох публікаціях, зокрема, у роботах [1, 2, 3, 6]. Усі ці залежності, крім (7), (8), виходять з розв’язання лінійних диференціальних систем рівнянь, що відповідають графу станів марковського процесу з безупинним часом, зображеному на рис. 1.

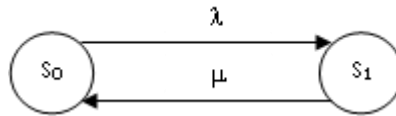


Рис. 1. Граф для визначення нестационарного коефіцієнта готовності

Відповідно графу система рівнянь для визначення нестационарного коефіцієнта готовності $Kz(t)$ як імовірності $p_0(t)$ працездатного стану виробу має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda p_0(t) - \mu p_1(t) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де для всякого моменту часу t виконується нормувальна умова

$$p_0(t) + p_1(t) = 1, \quad (10)$$

З урахуванням (10) переписемо (9) і отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -(\lambda + \mu)p_0(t) + \mu \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= (\lambda + \mu)p_0(t) - \mu \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

Система (9), (11) вирішується по початкових умовах:

$$p_0(0) = p, \quad p_1(0) = 1 - p, \quad (12)$$

де p – рівень готовності в момент $t=0$ (імовірність працездатного стану в початковий момент часу).

Перше рівняння в системі (11) представляє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння 1-го порядку. Розв’язуючи його методом варіації довільної сталої, одержимо послідовно

$$\begin{aligned} p_0(t) &= C(t)e^{-(\lambda+\mu)t}, \\ C'(t) &= \mu e^{-(\lambda+\mu)t}, \\ C(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{(\lambda+\mu)t} + k, \\ p_0(t) &= ke^{-(\lambda+\mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \end{aligned} \quad (13)$$

де k – параметр інтегрування. Використовуючи (12) і замінивши $p_0(t)$ на $Kz(t)$, остаточно отримаємо

$$K_{OG}(t) = \left(P - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right) e^{-(\lambda+\mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (14)$$

Наприклад, якщо в початковий момент $P=1$, то вираз для нестационарного коефіцієнта готовності буде мати такий вигляд:

$$K_{OG}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda+\mu)t} \right), \quad (15)$$

що збігається з формулою (5).

На додаток до формул (1)–(8) наведемо також рівність, пов'язану з обчисленням числа відмов пристрою. Згідно з [7], імовірність того, що елемент, який має інтенсивність відмов ($\lambda = \text{const}$), за час t відмовить рівно k разів (з врахуванням його миттєвого відновлення) може бути обчислена за формулою Пуассона

$$P_k(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^k}{k!}, \quad (16)$$

Для розрахунку показників надійності машин інженерного озброєння (прогнозування їхнього технічного стану з метою застосування адаптивних правил обслуговування і ремонту) використання формул (1)–(8), (16) припустимо лише на проміжках часу t , тривалістю від декількох годин до двох діб. У межах досить малого інтервалу $(t, t + \Delta t)$, хоча і кінцевого, інтенсивність відмов пристрою й інтенсивність його відновлення приблизно можна вважати незмінними величинами ($\lambda, \mu = \text{const}$) і співвідносити їх значення до моменту часу $(t + \frac{\Delta t}{2})$. Однак, використання цих моделей навіть на таких відрізках часу має супроводжуватися оцінкою адекватності отриманих результатів реальному технічному стану об'єкта.

Величину тривалості таких проміжків часу пропонується визначати таким методичним підходом. Для цього на кожному інтервалі розбиття (проміжках часу) визначається максимальне відхилення досліджуваних показників $\Delta\lambda$ та $\Delta\mu$, (рис. 2), при чому для випадку лінійної апроксимації інтенсивності відновлення та інтенсивності відновлення їх значення будуть величиною сталою для кожного інтервалу, а для інших випадків здійснюється пошук найбільшого інтервалу розбиття, за якого виконується умова, що величини $\Delta\lambda$ та $\Delta\mu$ не повинні перевищувати 5% від середнього значення інтенсивності відмов та інтенсивності відновлення.

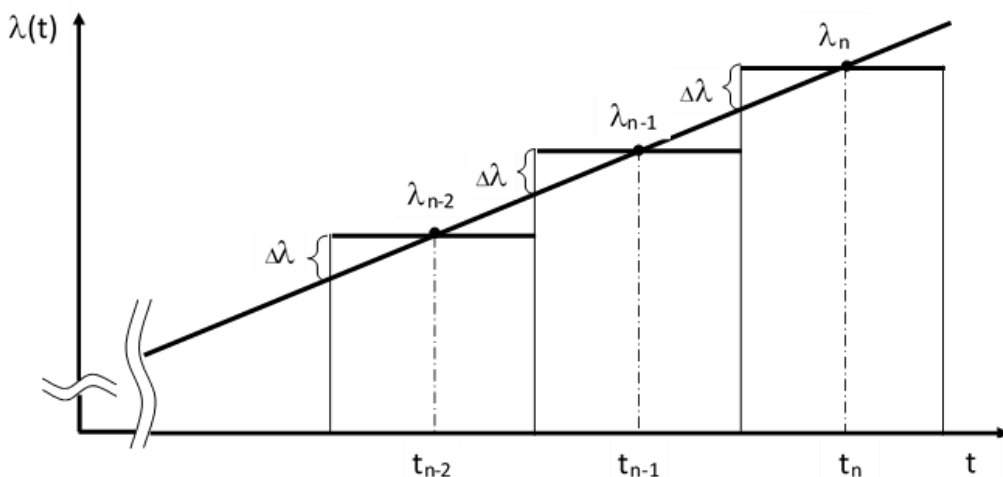


Рис. 2. Схема визначення максимального відхилення значень інтенсивності відмов на інтервалах розбиття від свого середнього значення

При дослідженні показників довговічності машин інженерного озброєння рекомендується пошук раціональних проміжків часу обирати на останніх інтервалах розбиття міжремонтних циклів, тому що значення комплексних показників надійності саме на останніх інтервалах розбиття міжремонтних циклів визначають значення показників довговічності виробу.

Висновки

При тривалій експлуатації машин інженерного озброєння показані вище формули неприйнятні для оцінки надійності виробів. Дані реальних вимірювань часу відмов і відновлення (на прикладі характерного зразка землерийної техніки шляхопрокладача БАТ-2), дослідна експлуатація зразків військової дорожньо-будівельної техніки й експериментальне дослідження наробітку основних блоків і вузлів машин інженерного озброєння показують, що інтенсивність відмов і відновлення виробів є функціями часу.

У випадку, коли $\lambda = \lambda(t)$, $\mu = \mu(t)$ і при цьому перша з функцій монотонно зростає, а інша монотонно збуває, процес відмов і відновлення не може вважатися зворотним, як показано на рис. 2. Властивість незворотності процесу обумовлює його неергодичність, оскільки зростання числа відмов супроводжується зростанням числа не відновлення. Неергодичність системи істотно змінює зміст задачі й ускладнює її розв'язання, тому напрямком подальших досліджень є розробка інших

концептуальних підходів до побудови математичних моделей показників надійності машин інженерного озброєння і методик розрахунку цих показників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Е. С. Вентцель, *Теория вероятностей*. – М.: Высшая школа, 1969.
- [2] Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, и А. Д. Соловьёв, *Математические методы в теории надёжности. Основные характеристики надёжности и их статистический анализ*. – М.: Наука, 1965.
- [3] П. В. Бирков, *Обеспечение надёжности машин инженерного вооружения при эксплуатации*. – М.: ВИА, 1985.
- [4] О. Г. Приймаков, и Р. М. Джус, *Надійність і ресурс авіаційної наземної техніки // Системи озброєння і військова техніка*. – 2006. – № 2(6). – С. 60-66.
- [5] В.Б.Срко, и І. П. Дудкін, «Щодо можливості подальшої експлуатації аварійних радіостанцій Р-855А1 в авіації Збройних Сил України» у *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2015, № 11(18), С. 167–171.
- [6] А. И. Александров, Ред. *Эксплуатация радиотехнических комплексов*. – М.: Сов.радио, 1976, 280 с.
- [7] Л. А. Овчаров, *Прикладные задачи теории массового обслуживания*. – М.: Машиностроение, 1969, 324с.
- [8] G. Zhyrov, S. Lienkov, Yu. Husak, H. Banzak, and I. Tolok, “Analysis of problem optimization of parameters maintenance process according to state with constant periodicity of control”, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. vol. 8, no. 6, pp. 2606–2611, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/63862020>.
- [9] G. Zhyrov, E. Lenkov, I. Tolok, I. Pampukha, H. Banzak, and D. Zaitsev, “Algorithm for optimizing the parameters of the maintenance process according to the state with a constant periodicity of control over the criterion of minimum unit cost of operation”, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. vol. 9, no. 4, pp. 5083–5088, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/130942020>.

Поляков Андрій Павлович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри військової підготовки, e-mail: poliakovap61@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Кривцун Володимир Іванович – канд. техн. наук, с. н. с., начальник кафедри інженерної техніки, e-mail: vik-08-74@i.ua.

Каленик Максим Миколайович – канд. техн. наук, с. н. с., заступник начальника кафедри інженерної техніки, e-mail: kalenik_max@i.ua.

Нагачевський В'ячеслав Йосипович – канд. техн. наук, професор кафедри інженерної техніки, e-mail: slavik.inag@gmail.com.

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

A. Poliakov¹
V. Kryvtsun²
M. Kalenyk²
V. Nagachevskyi²

A formalized representation of exponential models of the main indicators of reliability, the limitations of their use for the characteristics of engineering weapons

¹Vinnitsia National Technical University

²Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy

The article deals with the solution of a scientific and applied problem to study the possibility of using existing exponential models to determine the reliability indicators of engineering weapons. Exponential models are widely used to assess the reliability of objects, mainly consisting of radio electronic elements, which led to their mass distribution in the aviation industry, air defense facilities, etc. Experimental operation of typical samples of military road-building equipment and experimental studies of the operating time of the main blocks and assemblies of engineering weapons show that the rate of failure and restoration of these products are functions of time. This state of affairs is associated with the design features of engineering weapons, which are characterized by the complex use of electrical, mechanical, hydraulic and other systems, while during use these systems can often experience significant overloads. At the same time, it should be borne in mind that today the engineering weapons that are in the units generally have a service life longer than that guaranteed by the manufacturer, which significantly affects the parameters of failure rates and recovery. The article shows the procedure for obtaining expressions for calculating the main indicators of the reliability of complex technical systems with an exponential distribution of operating time to failure and their recovery time and it is allowed to use them only for minimal periods of time (from several hours to several days, depending on the intensity of the use of machines) due to the non-ergodic nature of the process of failures and restorations. In addition, the use of these models should be accompanied by an assessment of the adequacy of the results obtained to the real process with the adjustment of the duration of the corresponding time intervals.

Thus, the construction of mathematical models of the technical state of engineering equipment will be accompanied by a search for other conceptual approaches to determining the reliability indicators of engineering equipment and methods for calculating these indicators.

Key words: engineering weapons, exponential models, non-stationary availability factor, reliability indicators.

Poliakov Andriy – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Military Training, e-mail: poliakovap61@gmail.com.

Kryvtsun Volodymyr – Ph. D. (Eng), Senior Research Fellow, Head of the Department of Engineering Mechanics, e-mail: vik-08-74@i.ua.

Kalenyk Maksym – Ph. D. (Eng), Senior Research Fellow, Deputy Head of the Department of Engineering Mechanics, e-mail: kalenik_max@i.ua.

Nagachevskiy Viacheslav – Ph. D. (Eng), Professor of the Department of Engineering Mechanics, e-mail: slavik.inag@gmail.com.

А. П. Поляков¹
В. И. Кривцун²
М. М. Каленюк²
В. И. Нагачевский²

Формализованное представление экспоненциальных моделей основных показателей надежности, ограниченность их применения для характеристики машин инженерного вооружения

¹Винницкий национальный технический университет

²Национальная академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного

Статья касается решения научно-прикладной задачи по исследованию возможности применения существующих экспоненциальных моделей для определения показателей надежности машин инженерного вооружения. Экспоненциальные модели широко применяются для оценки надежности объектов, в основном состоящих из радиоэлектронных элементов, что обусловило их массовое распространение в авиационной отрасли, объектах противовоздушной обороны и т.д. Опытная же эксплуатация характерных образцов военной дорожно-строительной техники и экспериментальные исследования наработки основных блоков и узлов машин инженерного вооружения показывают, что интенсивность отказов и восстановлений данных изделий являются функциями времени. Данное положение дел связано с особенностями конструкции машин инженерного вооружения, отличающейся комплексным применением электрических, механических, гидравлических и других систем, при этом в ходе применения эти системы часто могут испытывать значительные перегрузки. При этом надо учитывать, что сегодня машины инженерного вооружения, которые находятся в подразделениях, в основном имеют срок эксплуатации больше гарантированного заводом-изготовителем, что существенно влияет на параметры интенсивностей отказов и восстановления. В статье показан порядок получения выражений для расчета основных показателей надежности сложных технических систем при экспоненциальном распределении наработки на отказ и времени их восстановления и допускается возможность их применения лишь для минимальных отрезков времени (от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от интенсивности применения машин) из-за незгодности процесса возникновения отказов и проведения восстановлений. Кроме того, использование данных моделей должно сопровождаться оценкой адекватности полученных результатов реальному процессу с корректировкой длительности соответствующих отрезков времени.

Таким образом, построение математических моделей технического состояния машин инженерного вооружения будет сопровождаться поиском других концептуальных подходов к определению показателей надежности машин инженерного вооружения и методик для расчета этих показателей.

Ключевые слова: машины инженерного вооружения, экспоненциальные модели, нестационарный коэффициент готовности, показатели надежности.

Поляков Андрей Павлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой военной подготовки, e-mail: poliakovap61@gmail.com.

Кривцун Владимир Иванович – канд. техн. наук, с.н.с., начальник кафедры инженерной техники, e-mail: vik-08-74@i.ua.

Каленюк Максим Николаевич – канд. техн. наук, с.н.с., заместитель начальника кафедры инженерной техники, e-mail: kalenik_max@i.ua.

Нагачевский Вячеслав Иосифович – канд. техн. наук, профессор кафедры инженерной техники, e-mail: slavik.inag@gmail.com.