

DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2019.11.39-45>

УДК 519.873:623.355.422

М.О. Слюсаренко¹, к.т.н.**О.М. Семененко¹**, д.військ.н., с.н.с.**Т.Л.Акініна²****О.І. Зарицький³****В.Л. Іванов³**, к.т.н., доц.¹Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ²Науково-дослідний центр Збройних Сил України Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»³Кафедра військової підготовки Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ЧАСУ НАРОБІТКУ ДО ВІДМОВИ ЗРАЗКА ОЗБРОЄННЯ БЕЗ УРАХУВАННЯ ВОГНЕВОГО ВПЛИВУ ПРОТИВНИКА

У статті запропонований варіант визначення функції розподілу часу наробітку до відмови зразка військової техніки. Проаналізований порядок обґрунтування такої функції без урахування вогневого впливу противника. Наведені причини розбіжності між заявленою безвідмовністю військової техніки і тою, що реально спостерігається у військах. Запропонована математична модель безвідмовності, яка на етапах проектування і конструювання дозволить задавати вимоги до зразка техніки за допомогою аналітичного опису. Обґрунтована послідовність розрахунків показників безвідмовності за умови використання розподілу Вейбулла.

Ключові слова: функція розподілу, час наробітку до відмови, моделювання безвідмовності, показники безвідмовності, час безперервної роботи

Для всіх зразків сучасного озброєння та військової техніки (ОВТ) пред'являються високі вимоги до готовності при бойовому застосуванні, надійного функціонування у ході бойових дій. У зв'язку з постійним удосконаленням ОВТ військ (сил), підвищенням їх бойових можливостей велика увага приділяється надійності цих зразків, з огляду на те, що невиконання завдань ними внаслідок відмов у роботі ОВТ може призвести до серйозних наслідків в операції (бою). Однак, на сучасному етапі безвідмовність зразків ОВТ не повною мірою відповідає вимогам забезпечення боєздатності. Недостатній рівень безвідмовності під час експлуатації та ведення бойових дій значною мірою обумовлений конструкторськими рішеннями та недосконалістю моделей, які застосовувалися під час проектування та розроблення сучасних зразків техніки.

Постановка проблеми

Однією з причин, яка обумовлює розбіжність між декларованими показниками безвідмовності та реальними, може бути некоректний вибір та обґрунтування функції розподілу часу наробітку до відмови бойових засобів. Зазвичай, під час розроблення цих засобів функція розподілу часу наробітку до відмови обирається за аналогією із схожими зразками ОВТ. Після закінчення дослідного виробництва на стадії серійного виробництва проводяться визначальні або контрольні випробування зразка техніки з метою визначення реальної його надійності, зокрема, безвідмовності в умовах, наближених до тих, у яких він буде застосовуватися за призначенням. У процесі цих випробувань ведеться спостереження за виконанням покладених на зразок функцій. Результати аналізу результатів експлуатації свідчать, що показники безвідмовності, які отримуються, не збігаються із тими, що задаються під час розроблення. Для того, щоб зменшити цю розбіжність, можна спробувати обрати іншу функцію розподілу часу наробітку до відмови, яка б більш точно відображала змінення безвідмовності протягом усього часу експлуатації ОВТ. У цьому полягає актуальність даної статті.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Вибору функції розподілу часу безвідмовної роботи (наробітку на відмову або до відмови) у теорії надійності приділяється особлива увага. Так, у [1] автори детально зупиняються на законах розподілу як дискретних, так і безперервних випадкових величин. Розглядаються питання ефективності складних систем та методи моделювання процесів їх функціонування з урахуванням законів розподілу випадкових величин. У [2; 3] автори наводять основні показники надійності для довільного закону розподілу часу до відмови, переваги та недоліки існуючих законів розподілу випадкових величин. Спілка авторів у [4] вирішує обернену задачу: формування можливих значень випадкових величин із заданим законом розподілу.

Незважаючи на те, що у названих роботах автори торкаються питання вибору функції розподілу часу наробітку до відмови (на відмову), порядок цього вибору викладений досить стисло, конспективно. Тому потрібно більш ретельно проаналізувати порядок обґрунтування цих функцій.

Отже, метою статті є вибір та обґрунтування функції розподілу часу наробітку до відмови зразка озброєння у певних умовах його експлуатації, але без урахування вогневого впливу з боку противника.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Розбіжність між заявленою безвідмовністю ОБТ і тою, що реально спостерігається у військах, може пояснюватися невірно прийнятою гіпотезою про розподіл часу наробітку до відмови. Так, безвідмовність може моделюватися без урахування витрати ресурсу, старіння та зношування комплектуючих зразка техніки, тобто з використанням експоненціального (однопараметричного) закону розподілу випадкової величини часу \tilde{T} безвідмовної роботи:

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

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи;

t – час безперервної роботи, год;

λ – інтенсивність потоку відмов, 1/год.

Але будь-яка техніка старіє. Старіння параметрів зразка техніки відбувається повільно, тому функція старіння $\lambda(t)$ є монотонно зменшуваною або монотонно зростаючою функцією часу [5]. У зв'язку з цим доцільно моделювати безвідмовність не однопараметричним (λ) експоненціальним розподілом випадкової величини часу \tilde{t} наробітку до відмови ОБТ, а більш загальним, більш гнучким розподілом, наприклад, двопараметричним (θ, α) розподілом Вейбулла:

$$P(\tilde{T} > t) = e^{-\theta t^\alpha}, \quad (2)$$

де θ – параметр масштабу, у даному випадку виконує функцію інтенсивності потоку відмов;

α – параметр, який враховує старіння та зношування комплектуючих ОБТ за рахунок наробітку, витрати ресурсу.

Використання розподілу Вейбулла, як математичної моделі безвідмовності ОБТ, дозволить на етапах проектування і конструювання задавати вимоги до зразка техніки за допомогою аналітичного опису безвідмовності, на відміну від статистичного способу, коли статистика про зміну стану ОБТ відсутня.

Змінюючи вираз для параметра θ , наприклад, під час випробувань ОБТ, можна від розподілу Вейбулла, який був прийнятий спочатку, перейти до розподілів іншого вигляду, аж до гамма-розподілу.

Змінення ж параметра α у розподілі Вейбулла дозволить врахувати певний рівень старіння, зношування ОБТ у процесі його експлуатації у військах.

У разі двопараметричного (θ, α) розподілу Вейбулла інтенсивність потоку відмов ОВТ, як відомо [6, 7], дорівнює:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \alpha \cdot \theta \cdot t^{\alpha-1}, \quad (3)$$

де $f(t)$ – щільність розподілу часу наробітку до відмови (на відмову) ОВТ (ймовірність виникнення відмови цього зразка протягом нескінченно малого проміжку часу $(t, t + \Delta t)$, яка віднесена до величини даного проміжку Δt) [5].

Тоді функція розподілу часу наробітку до відмови (ймовірність відмови) ОВТ відповідно

$$Q(\tilde{T} < t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\theta \cdot t^\alpha}, \quad (4)$$

а щільність функції розподілу часу наробітку до відмови дорівнює:

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dP}{dt} = \lambda(t) \cdot P(t) = e^{-\theta \cdot t^\alpha} \cdot \theta \cdot \alpha \cdot t^{\alpha-1}. \quad (5)$$

Параметр α може набувати таких значень:

$\alpha < 1$ – за прихованих дефектах, в основному обумовлених виробництвом ОВТ. Вони зникають у період прироблення техніки;

$\alpha = 1$ – у разі раптових відмов у період звичайної експлуатації ОВТ;

$1 < \alpha < 2$ – для ОВТ з певною величиною витраченого ресурсу та проявом елементів старіння та зношування;

$\alpha > 2$ – у разі істотного витрачання ресурсу у період значного зношування і старіння ОВТ.

Зокрема, коли $\alpha = 1$, розподіл Вейбулла співпадає з експоненціальним.

За $\alpha = 2$, розподіл Вейбулла перетворюється на відомий розподіл Релея із відповідними параметрами [6], який досить повно описує змінення стану елементів та зразків ОВТ з вираженим ефектом старіння та зношування.

За $\alpha > 3,5$, розподіл Вейбулла практично збігається з нормальним законом розподілу, що є, як відомо, граничним видом багатьох розподілів відповідно до центральної граничної теореми теорії ймовірності [8].

У результаті використання розподілу Вейбулла розрахункове значення ймовірності безвідмовної роботи ОВТ $P(t)$ за певного вибору часу t безперервної роботи, параметрів розподілу Вейбулла та за одного й того самого значення часу наробітку до відмови може набувати менших значень, ніж за експоненціального розподілу. Наприклад, у разі змінення параметра α та часу t безперервної роботи ОВТ, припустимо, за $\theta = 1$, результати розрахунку $P(t) = e^{-t^\alpha}$ за Вейбуллівського ($\alpha \neq 1$) та експоненціального ($\alpha = 1$) розподілів часу між відмовами наведені у табл. 1 та на рис. 1.

Як видно, за $\theta = 1$, усі криві $P(t)$ виходять з однієї точки з координатами $(0; 1)$ і далі проходять через одну й ту саму точку з координатами $(1; 0,37)$, причому в інтервалі часу t безперервної роботи ОВТ від 0 до 1 год значення $P(t)$ збільшується із збільшенням α , а за $t > 1$ год значення $P(t)$, навпаки, зменшуються із збільшенням α .

Таблиця 1

Ймовірність безвідмовної роботи ОВТ за різних значень часу безперервної роботи ($\theta = 1$)

	Значення t , год					
	0	0,5	1	1,5	2	3
$P(t) = e^{-t^{0,5}}$	1	0,49	0,37	0,29	0,24	0,18
$P(t) = e^{-t}$	1	0,61	0,37	0,22	0,14	0,05
$P(t) = e^{-t^{1,5}}$	1	0,70	0,37	0,16	0,06	0,01
$P(t) = e^{-t^2}$	1	0,78	0,37	0,11	0,02	0,00

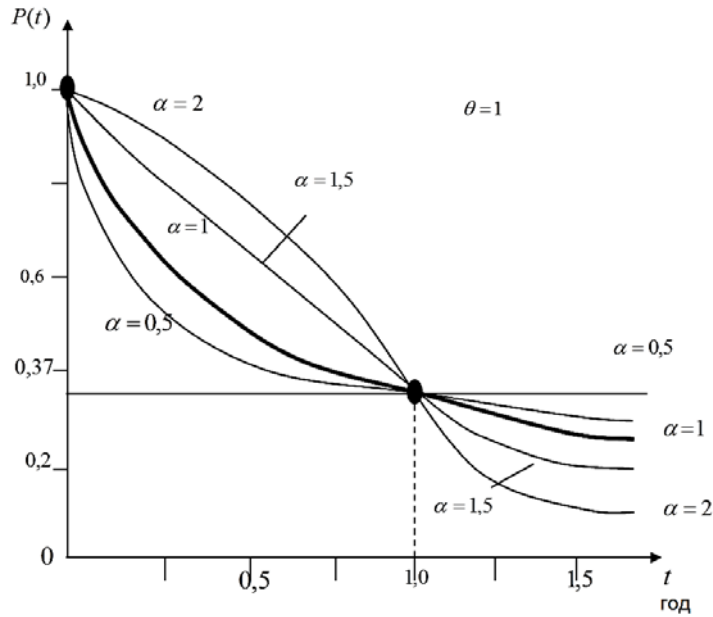


Рис. 1. Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від часу безперервної роботи t за змінення параметра α та незмінному $\theta = 1$

Розподіл Вейбулла досить коректно відображає поведінку складних зразків ОБТ у процесі їх експлуатації, залежність інтенсивності відмов $\lambda(t)$ від тривалості експлуатації СВУ, яка відповідає трьом характерним періодам (рис. 2):

період прироблення ($\alpha < 1$), протягом якого виявляються всі дефекти, обумовлені в основному технологічними причинами, а не властивістю конструкції ОБТ, внаслідок чого протягом цього періоду $\lambda(t)$ зменшується;

період звичайної (нормальної) експлуатації ($\alpha = 1$), протягом якого можуть виникати раптові відмови та упродовж якого інтенсивність відмов $\lambda(t)$ залишається приблизно постійною $\lambda(t) = \lambda - const$;

період зношування ($\alpha > 1$), викликаний процесами старіння та зношування, протягом якого переважно відбуваються поступові відмови, внаслідок чого $\lambda(t)$ зростає.

Р О З П О Д І Л

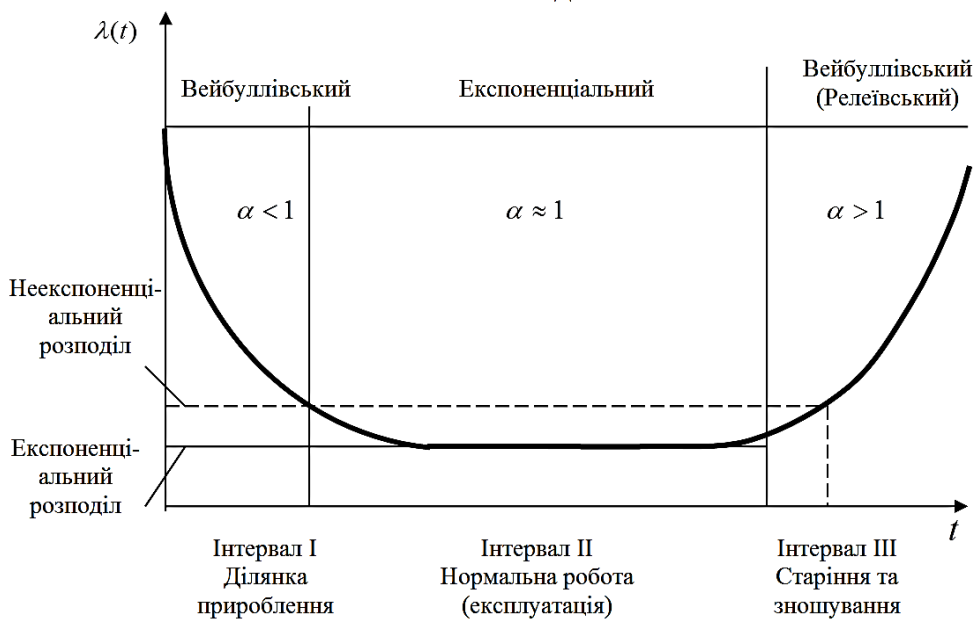


Рис. 2. Вид функції $\lambda(t)$

З використанням розподілу Вейбулла розрахунки показників безвідмовності доцільно здійснювати у певній послідовності.

Сутність цієї послідовності зводиться до того, що залежно від заданої величини $P(t) = e^{-\theta t^\alpha} \geq P_{ПОТР}$ протягом якогось часу t безперервної роботи ОВТ при використанні Вейбулівського розподілу часу наробітку до відмови спочатку визначається граничне значення параметра:

$$\theta_{ПР} = -\frac{\ln P(t)}{t^\alpha} = -\frac{\ln P_{ПОТР}}{t^\alpha}. \quad (7)$$

Потім обчислюється середня величина часу наробітку до відмови на період нормальної експлуатації ОВТ, коли умовно можна вважати $\alpha = 1$, а також за $\alpha > 1$ (тобто з урахуванням старіння, зношування комплектуючих):

$$T_{CP} = \frac{1}{\theta_{ПР}}. \quad (8)$$

Це доречно проілюструвати на прикладі. Спочатку розрахуємо значення наробітку на відмову за експоненціального закону розподілу випадкової величини. Так, за $P(t) = e^{-\theta \cdot t^\alpha} \geq P_{ПОТР} = 0,95$, $t = 5$ год та $\alpha = 1$, виходить, що граничне (припустиме) значення параметра

$$\theta_{ПР} = -\frac{\ln P_{ПОТР}}{t} = -\frac{-0,051}{5} = 0,0102,$$

отже, середній час наробітку до відмови при цьому буде складати:

$$T_{CP} = \frac{1}{\theta_{ПР}} = 98 \approx 100 \text{ год.}$$

За Вейбулівського розподілу часу безвідмовної роботи з $\alpha = 1,4$ (близько 70% витрати ресурсу), $t = 5$ год, $P(t) = e^{-\theta \cdot t^\alpha} \geq P_{ПОТР} = 0,95$ граничне значення параметра

$$\theta_{ПР} = -\frac{\ln P_{ПОТР}}{t^\alpha} = -\frac{-0,051}{5^{1,4}} = 0,005,$$

а середній час наробітку до відмови:

$$T_{CP} = \frac{1}{\theta_{ПР}} = \frac{1}{0,005} = 200 \text{ год,}$$

що значно перевищує раніше обчислене значення $T_{CP} \approx 100$ год за експоненціального розподілу, тобто без урахування зростання інтенсивності відмов (старіння і зношування), у міру загального наробітку даного зразка ОВТ.

Вочевидь, що при урахуванні більшої величини (понад 70%) витраченого ресурсу ОВТ, тобто при $\alpha > 1,4$ значення $T_{CP} > 200$. Таким чином, якщо на етапі проектування ОВТ задати величину середнього часу наробітку до відмови $T_e = 200$ год, то можна сподіватися, що у період експлуатації середній час наробітку до відмови протягом t складе заявлену раніше величину цього часу $T_{ПОТР} = 100$ год.

Висновки

Таким чином, у даній статті авторами визначена функція розподілу часу наробітку до відмови зразка озброєння без урахування вогневого впливу противника.

Порівняння значень T_{CP} для $t = 5$ год за експоненціального та Вейбулівського розподілах часу безвідмовної роботи ОВТ свідчить про те, що з метою підвищення гарантії у виконанні певних вимог до

безвідмовності більш переважним, з цієї точки зору, є використання ще на етапі проектування для розрахунку показників безвідмовності розподілу Вейбулла. Деяка надмірність у вимогах до безвідмовності ОВТ, яка при цьому виникає, виправдана для подальшої експлуатації техніки у військах, з огляду на важливість цього зразка. Доцільність використання розподілу Вейбулла обумовлює можливість урахування змінення (зменшення) значень показників безвідмовності під час досить тривалої експлуатації ОВТ, коли може виявлятися ефект старіння та зношування комплектуючих. Але остаточне значення показників безвідмовності ОВТ необхідно приймати після урахування умов бойової обстановки, в яких використовується цей зразок. Для цього необхідно удосконалити математичну модель та в цілому метод математичного (аналітичного) моделювання процесу безвідмовної роботи ОВТ у бойових умовах. Це й буде предметом подальших досліджень.

Перспективи подальших досліджень

Отже предметом подальших досліджень за цим напрямком буде визначення функції розподілу часу наробітку до відмови зразка озброєння з урахуванням вогневого впливу противника.

Список використаних джерел

1. Шишонов Н. А. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники [Текст]. Н. А. Шишонов, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. М.: Советское радио, 1964. 551 с.
2. Козлов Б. А. Справочник по расчету надежности [Текст] / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. М.: Советское радио, 1966. 432 с.
3. Кузнецов, В. А. Основные вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст]. В. А. Кузнецов. М.: Энергия, 1965. 256 с.
4. Ковтуненко А. П. Математическое моделирование в задачах исследования надежности технических систем [Текст]: монография: А. П. Ковтуненко, В. В. Зубарев, Б. Н. Ланецкий, А. А. Зверев. К.: Кн. изд-во Нац. авиац. ун-та, 2006. 234 с.
5. Широков А. М. Надежность радиоэлектронных устройств [Текст]. А. М. Широков. М.: Высшая школа, 1972. 272 с.
6. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем [Текст]. Г. В. Дружинин. М.: Энергия, 1977. 535 с.
7. Креденцер Б. П. Основы надежности и технического обеспечения радиоэлектронных средств РТВ ПВО [Текст]. Б. П. Креденцер, В. Г. Тоценко. К.: КВИРТУ, 1983. 164 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей [Текст]: учеб. пос. для вузов. М.: Наука, 1964. 576 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА ОБРАЗЦА ВООРУЖЕНИЯ БЕЗ УЧЕТА ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТИВНИКА

М.А.Слюсаренко, О.М. Семененко, Т.Л.Акинина, О.И. Зарицький, В.Л. Иванов

В статье предложен вариант определения функции распределения времени наработки до отказа военной техники. Проанализирован порядок обоснования такой функции без учета огневого воздействия противника. Приведены причины расхождения между заявленной безотказностью военной техники и той, которая реально наблюдается в войсках. Предложена математическая модель безотказности, которая на этапах проектирования и конструирования позволит задавать требования к образцу техники с помощью аналитического описания. Обоснована последовательность расчетов показателей безотказности при условии использования распределения Вейбулла.

Ключевые слова: функция распределения, время наработки до отказа, моделирование безотказности, показатели безотказности, время непрерывной работы.

DETERMINATION OF THE DISTRIBUTION FUNCTION OF THE TIME BETWEEN FAILURES OF A WEAPON MODEL WITHOUT TAKING INTO ACCOUNT THE ENEMY'S FIRE IMPACT

M. Sliusarenko, O. Semenenko, T. Akinina, O. Zaritsky, V. Ivanov

In the article, based on the analysis of the requirements for the readiness of weapons and military equipment during combat use and the reliability of their operation in the course of combat operations, it was discovered that one of the reasons that causes a discrepancy between the declared failures and real ones may be the incorrect choice and justification of the time distribution function up to the refusal of military means. As a rule, during the development of these tools, the function of distribution of time to failure is chosen by analogy with similar patterns of weapons and military equipment. In the theory of reliability, special attention is given to choosing the function of time-breaking non-response (failures or failures). Therefore, the article deals with the questions of evaluating the effectiveness of functioning of complex systems and methods of modeling the processes of their functioning, taking into account the laws of the distribution of random variables.

The discrepancy between the declared irregularity of the military apparatus and the fact that is actually observed in the troops can be explained by the incorrectly accepted hypothesis about the distribution of time to failure. Therefore, the article analyzes the order of the justification of such a function without taking into account the enemy's fire impact and the proposed variant of determining the function of distribution of the time of work until the refusal of the model of military equipment. The article also cites the reasons for the discrepancy between the claimed missile defense equipment and what is actually observed in the troops. The proposed mathematical model of faultlessness, which at stages of designing and design will allow to set requirements to the model of technology with the help of analytical description. The sequence of calculations of non-failure indexes based on the use of Weibull distribution is substantiated.

Keywords: *distribution function, time to failure, reliability simulation, reliability indicators, continuous operation time.*