

М.О. Слюсаренко¹, О.М. Семененко¹, Р.В. Бойко², О.Ю. Коркін³

¹ Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ

² Національний університет оборони України ім. І. Черняховського, Київ

³ Військова академія, Одеса

ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ ЗРАЗКА БОЙОВОЇ ТЕХНІКИ

У статті авторами запропонований удосконалений процес визначення та обґрунтування параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка бойової техніки. Розглядається причини розбіжності між безвідмовністю техніки, яка зазначена у формулярі й тою, що спостерігається при експлуатації. Однією з причин низької надійності (безвідмовності) техніки є недоліки у формуванні показників безвідмовності на етапі проектування. Зазначено, що при обґрунтуванні безвідмовності у технічному завданні дуже важливо правильно визначити ймовірність безвідмовної роботи, наробіток до відмови (на відмову) та час безперервної роботи. Розглянуте питання вибору виду функції розподілу часу безвідмовної роботи залежно від умов експлуатації зразка техніки, а також від особливостей її конструкції. Аналіз заводських та полігонних випробувань техніки свідчить, що існує невідповідність, яка виникає між потрібною безвідмовністю зразків техніки та значно низькою безвідмовністю цих зразків, яка спостерігається при експлуатації. Однією з причин такої розбіжності є недоліки методів математичного моделювання безвідмовності, які існують сьогодні. Сучасні методи не завжди враховують найважливіші фактори, що впливають на стан цих зразків у певних умовах застосування. Для того, щоб зменшити цю розбіжність запропонований спосіб моделювання параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки. У дослідженні використані основні положення теорії надійності.

Ключові слова: безвідмовність техніки, ймовірність безвідмовної роботи, наробіток на відмову, час безперервної роботи, функція розподілу часу безвідмовної роботи, проектування зразка техніки.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз розвитку озброєння провідних країн світу та його застосування у сучасних воєнних конфліктах [1–4], свідчить про те, що сучасні вимоги щодо підвищення якості зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) постійно зростають. Перед керівництвом ЗС України, в умовах необхідності значного оновлення озброєння та військової техніки Збройних Сил (ЗС) України та обмеженості фінансування цих заходів постійно постає завдання обґрунтування вибору зразків озброєння на перспективу [1; 5]. Обрані в програмах розвитку ОВТ та ЗС України перспективні зразки озброєння повинні задовольняти вимоги щодо вирішення завдань, які постають перед збройними силами, і бути економічно досяжними (реальними). Попередні роки розвитку ЗС України показували, що в складних умовах забезпечення ЗС України (1996–2013 роки), більшість перспективних зразків озброєння визначалися за принципом аналогії чи мінімально необхідної потреби без урахування економічних можливостей держави [2].

В сучасних умовах розвитку ЗС України ці задачі повинні вирішуватися тільки на основі критеріїв воєнно-економічної ефективності. В загальному вигляді, постановка вирішення задач вибору раціонального перспективного зразка озброєння може бути двох видів: перший – мінімізація витрат за фік-

сованого рівня ефективності зразка озброєння; другий: максимізація ефективності за фіксованого ресурсного показника. В більшості провідних країн світу перша постановка вважається найбільш адекватною [3–4].

Сьогодні під час обґрунтування нових програм розвитку ОВТ однією із важливих вимог щодо вибору подальшого розвитку ОВТ постає вимога врахування динаміки розвитку ЗС України протягом програмного періоду [4]. Важливим фактором, який обмежує темпи вкладання фінансових ресурсів в розвиток ОВТ, є нерівнозначність різних за часом витрат та отриманого ефекту або прибутку (економії) від них, який у більшості наукових джерел визначається коефіцієнтами капіталовкладень [1–6]. У загальному випадку ефект від зміни асигнувань, які виділяються на розвиток ОВТ, повинен розраховуватися під час обґрунтування програм розвитку ОВТ на період також, як і інші економічні фактори (рівні фінансування, економічність, воєнно-економічний ефект тощо). Однією із задач, які виникають в таких умовах, є необхідність врахування розмірів та темпів витрат на різних етапах життєвого циклу елементів ОВТ, тому що під час визначення сумарних витрат треба враховувати необхідний цільовий ефект щодо надійності зразка ОВТ, який потрібен на визначений момент часу. Це дозволить уникнути помилок під час обґрунтування кінцевих результатів

програм розвитку ОБТ та підвищити ефективність їх складання та виконання.

При розробленні зразка техніки передбачається виконання вимог до його характеристик, які визначені у технічному завданні. До зразків техніки повинні пред'являтися жорсткі вимоги з точки зору надійності, оскільки відмова під час роботи може призвести до невиконання основних функцій, а також до аварій та техногенних катастрофам. Одним з показників надійності, як відомо, є безвідмовність [1]. Досвід свідчить, що безвідмовність техніки при експлуатації значно нижча, ніж та, що вказана у формулярі (отримана у ході заводських та полігонних випробувань). Тому є необхідність розглянути причини такої розбіжності та визначити спосіб моделювання безвідмовності техніки ще на етапі її проектування для підвищення надійності, а саме безвідмовності.

Складність технічних систем та устаткування дедалі зростає. Із підвищенням вимог до якості техніки та умов її роботи, як наслідок, зростають вимоги до надійності, зокрема – до безвідмовності. Відмова з технічних причин або від бойового впливу противника під час бойових дій може призвести до невиконання поставленої мети, а відповідно, й до зниження боєздатності зенітних ракетних військ. Нині бойовій техніці притаманний недостатній рівень безвідмовності під час експлуатації та бойового застосування. Це викликано як конструкторськими рішеннями так і недосконалістю моделей, які застосовуються під час проектування. Крім того, не враховується бойовий вплив противника і з цим важко погодитися.

Аналіз останніх досліджень, публікацій. Проблемами надійності та безвідмовності займалися багато авторів. У [2] викладені принципи побудови математичних моделей, розглянуті теоретичні основи аналітичного, а також імітаційного моделювання функціонування технічних систем у задачах дослідження їх надійності. У [3] велику увагу приділено аналізу причин відмов та методам розрахунку надійності апаратури. Оскільки більшість зразків техніки є комплексними, то виникає необхідність обґрунтування вимог до технічних показників складних систем. Основи теорії комплексного обґрунтування вимог до технічних показників представлені у [4]. Методи оцінювання та обліку надійності технічних засобів, параметрів, що характеризують надійність, а також характеристик надійності різних технічних систем розглянуті у [5].

Незважаючи на те, що у вказаних роботах автори торкаються питання безвідмовності на етапі проектування зразка техніки, практика свідчить про те, що є розбіжність між декларованими показниками безвідмовності та тими, які реально спостерігаються на практиці. Отже, виникає необхідність ре-

тельного аналізу та визначення безвідмовності на етапі проектування зразка техніки.

Отже, **мета статті** полягає у тому, щоб запропонувати спосіб визначення та обґрунтування параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки.

Виклад основного матеріалу

З точки зору [6], безвідмовність – це властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або наробітку. Аналітично безвідмовність визначається функцією:

$$P(\tilde{T} > t) = f(T, t), \quad (1)$$

де $P(\tilde{T} > t)$ – ймовірність безвідмовної роботи; \tilde{T} – випадкова величина наробітку до відмови, якщо об'єкт невідновлюваний (на відмову – якщо об'єкт відновлюваний); t – час безперервної роботи; T – наробіток до відмови (на відмову).

Як видно, про ймовірність безвідмовної роботи можна вести мову тоді, коли випадкова величина наробітку до відмови (на відмову) більше ніж час безперервної роботи, тобто відмова не відбудеться.

І навпаки, ймовірність відмови $Q(\tilde{T} < t)$ можлива, коли випадкова величина наробітку до відмови (на відмову) менше ніж час безперервної роботи, оскільки ймовірність відмови протилежна ймовірності безвідмовної роботи:

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (2)$$

Моделювання безвідмовності, тобто вид функції (1) може бути різним та залежить від умов експлуатації, а також від особливостей конструкції техніки.

Обґрунтоване завдання безвідмовності у технічному завданні за допомогою математичної моделі обумовлено правильним вибором значень ймовірності безвідмовної роботи, наробітку до відмови (на відмову) та часом безперервної роботи. Недоліком деяких підходів до вирішення цієї проблеми є те, що у формулярах на зразок техніки вказаний середній час наробітку до відмови (на відмову) T_{CP} , але не вказано з якою ймовірністю відмова може відбутися або не відбутися. Часто не уточнюється час безперервної роботи зразка або він задається некоректно. Тому причинами низької надійності техніки, що іноді відбувається, є ті недоліки на етапі проектування, які описані вище.

Розглянемо гіпотетичний приклад. Припустимо, при розробленні вирішили, що час безвідмовної роботи розподіляється за експоненціальним законом:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{1}{T}t}, \quad (3)$$

де λ – інтенсивність відмов зразка техніки, 1/год, величина обернена наробітку до відмови (на відмову);

t – час безперервної роботи, год.

При застосуванні навіть цієї простої залежності $P = f(T, t)$, ми стикаємось з рівнянням із двома невідомими, якщо воно записано у явному вигляді та трьома невідомими якщо воно записано у неявному вигляді $(P, T, t) = 0$.

Згідно важливості зразка техніки задається ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$. Нехай $P(t) = 0,95$. Час безперервної роботи t задається згідно до умов експлуатації а також рекомендацій фахівців. Припустимо $t = 5$ год. Таким чином з трьох невідомих встановлено два, значить, третій можна знайти. Логарифмуючи вираз (3), знаходимо наробіток до відмови (на відмову) T :

$$\lg P = -\frac{t}{T} \Rightarrow T = -\frac{t}{\lg P}. \quad (4)$$

Підставляючи значення $t = 5$ год та $P(t) = 0,95$ у (4), отримаємо

$$T = -\frac{t}{\lg P(t)} = -\frac{5}{\lg 0,95} = -\frac{5}{-0,051} = 98 \text{ год.}$$

У даному випадку наробіток до відмови (на відмову) складає майже 100 год. Але експоненціальний закон однопараметричний, тобто не враховує старіння, зношення зразка техніки та його комплектуючих [7]. Більшість техніки, особливо військової, має достатньо великий термін експлуатації. Якщо врахувати цей аспект, то вочевидь, необхідно застосувати інший закон, наприклад двопараметричний закон розподілу часу безперервної роботи Вейбулла:

$$P(t) = e^{-\frac{1}{T}t^\alpha}, \quad (5)$$

де α – параметр, який враховує старіння, зношення зразка техніки.

Наприклад, при $\alpha = 1,4$ (вироблення ресурсу близько 60%, обирається згідно таблиць):

$$T = -\frac{t^\alpha}{\lg P(t)} = -\frac{5^{1,4}}{\lg 0,95} = -\frac{9,52}{-0,051} = 186,6 \approx 190 \text{ год.}$$

Як видно, у цьому випадку наробіток до відмови (на відмову) майже вдвічі більше ніж при розрахунку без урахування старіння та зношення комплектуючих. Якщо врахувати ще додаткові фактори, такі як агресивні умови зовнішнього середовища (клімат, рельєф місцевості, сейсмогенні умови, стихійні лиха, для військової техніки бойовий вплив противника тощо), то значення цього показника стане ще більшим. Попередні розрахунки свідчать, що T може доходити до 480 год. Значить, при проектуванні необхідно моделювати параметри безвідмовності таким чином, щоб модель враховувала всі основні фактори, які впливають на експлуатацію та, з рештою, будуть знижувати надійність, а саме без-

відмовність техніки. Вказані додаткові фактори і раніше розглядалися дослідниками, наприклад у [8].

Крім того, основними шляхами удосконалення процесу моделювання параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки можна вважати такі:

при завданні у технічних умовах наробітку до відмови (на відмову) необхідно вказати, з якою ймовірністю можна досягнути такого значення даного показника, щоб уникнути невизначеності під час оцінювання безвідмовності техніки. Невиконання цієї умови є однією з причин розбіжності часу безвідмовної роботи, вказаного у формулярі на зразок, з тим, яке спостерігається під час експлуатації. Ймовірність безвідмовної роботи (або ймовірність відмови) необхідно встановлювати, виходячи з важливості зразка техніки для виконання конкретного завдання;

під час моделювання параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки необхідно вказувати час безперервної роботи конкретного зразка техніки. Цей час встановлюють з огляду на досвід роботи аналогічних зразків та опитування фахівців даної галузі;

при моделюванні параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки необхідно врахувати можливі змінення (зниження) показників безвідмовності, коли починають з'являтися елементи зношування, старіння комплектуючих, та обрати відповідну функцію розподілу часу безвідмовної роботи або наробітку до відмови (на відмову);

Висновки

Отже, на етапі проектування зразка техніки визначати параметри безвідмовності пропонується таким чином:

при завданні у технічних умовах наробітку до відмови (на відмову) необхідно вказувати, з якою ймовірністю можливо досягнути такого значення даного показника, щоб уникнути невизначеності при оцінюванні безвідмовності техніки. Невиконання цієї умови є однією з причин розбіжності у часі безвідмовної роботи, що вказаний у формулярі із тим, що спостерігається при експлуатації. Ймовірність безвідмовної роботи (або ймовірність відмови) необхідно встановлювати виходячи з важливості зразка техніки для виконання конкретного завдання;

при моделюванні параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки необхідно вказувати час безперервної роботи конкретного зразка техніки. Цей час встановлюють виходячи з досвіду роботи аналогічних зразків та опитування фахівців (експертів) даної галузі;

при моделюванні параметрів безвідмовності на етапі проектування зразка техніки необхідно врахувати можливі змінення (зниження) показників без-

відмовності, коли починають проявлятися елементи зношення, старіння комплектуючих та обрати відповідну функцію розподілу часу безвідмовної роботи або наробітку до відмови (на відмову);

Важливим моментом є врахування додаткових факторів, таких як агресивні умови зовнішнього середовища (клімат, рельєф місцевості, сейсмогенні

умови, стихійні лиха, для військової техніки – бойовий вплив противника тощо) Урахування усіх цих недоліків, на думку авторів, дозволить більш обґрунтовано визначати параметри безвідмовності на етапі проектування техніки та досягти їх прийнятних значень. Це й буде напрямком подальших досліджень.

Список літератури

1. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1966. – 432 с.
2. Математическое моделирование в задачах исследования надежности технических систем: моногр. / А.П. Ковтуненко, В.В. Зубарев., Б.Н. Ланецкий, А.А. Зверев. – К.: Кн. изд-во Нац. авиац. ун-та, 2006. – 234 с.
3. Широков А.М. Надежность радиоэлектронных устройств / А.М. Широков. – М.: Высшая школа, 1972. – 272 с.
4. Основы теории комплексного обоснования требований к техническим показателям сложных систем: моногр. / В.В. Зубарев и др. – К.: Кн. изд-во Нац. авиац. ун-та, 2010. – 356 с.
5. Канарчук В.С. Надежность машин / В.С. Канарчук, С.К. Полянський, М.М. Дмитриев. – К.: Лыбидь, 2003. – 424 с.
6. ГОСТ СССР 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
7. Стрельников В.П. Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры [Текст] / В.П. Стрельников // Математичні машини і системи. – К., 2007. – № 3,4. – С. 227-238.
8. Креденцер Б.П. Основы надежности и технического обеспечения радиоэлектронных средств РТВ ПВО [Текст] / Б.П. Креденцер, В.Г. Тоценко. – К.: КВИРТУ, 1983. – 164 с.

References

1. Kozlov, B.A. and Ushakov, E.A. (1966), “*Spravochnik po raschety nadezhnosti*” [Reference book on reliability calculation], Soviet Radio, Moscow, 432 p.
2. Kovtunenکو, O.P., Zubarev, V.V., Lanetzky, A.P. and Zverev, A.A. (2006), “*Matematicheskoe modelirovani v zadachax issledovaniy nadezhnosti texnicheskix system*” [Mathematical modeling in tasks of investigation reliability technical systems], National Air University publ house, Kyiv, 234 p.
3. Shirokov, A.M. (1972), “*Nadezhnost' radioelektronnix system*” [Radio electronic reliability systems], Higher School, Moscow, 272 p.
4. Zubarev, V.V., Kovtunenکو, A.P., Vasilenko, A.V. and Shishanov, M.A. (2010), “*Osnovy teoree kompleksnogo obosnovaniy trebovaniy k texnicheskim pokazatelym sloznix system*” [Base theory of complex grounds demands to technical indices], National Air University publish house, Kyiv, 356 p.
5. Kanarchuk, V.E., Polynsky, S.K. and Dmytriev, M.M. (2003), “*Nadezhnost mashin*” [Reliability machine], Kyiv, Lubid, 424 p.
6. GOST USSR 27002-89 (1990), “*Nadezhnost v texnike. Osnovnye ponytiy. Terminy i opredeleniy*” [Reliability in technique. Main notions. Terms and determinations], Standart Rublishing House, Moscow, 37 p.
7. Strelnikov, V.P. (2007), “*Novay texn]lgiiy issledovaniy nadezhnosti mashin i apparatury*” [New reliability investigation technology of machine and equipment], *Mathematical machine and systems*, No. 3, 4, pp. 227-238.
8. Kredentser, B.P. and Trotzenko, V.G. (1983), “*Osnovi nadezhnosti i texnicheskogo obespecheniy radioelektronnix sredstv PTV PVO*” [Reliability and technical providing of radio-electronic means of Radio Technicaj Forces (PVO)], KVIPTY, Kyiv, 164 p.

Надійшла до редколегії 10.09.2018

Схвалена до друку 16.10.2018

Відомості про авторів:

Слюсаренко Марина Олександрівна

кандидат технічних наук

Центрального науково-дослідного інституту

Збройних Сил України,

Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-4165-3908>

Семененко Олег Михайлович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник

начальник відділу Центрального науково-дослідного

інституту Збройних Сил України,

Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-6477-3414>

Information about the authors:

Marina Sliusarenko

Candidate of Technical Sciences

of Central Research Institute

of the Armed Forces of Ukraine,

Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-4165-3908>

Oleg Semenenko

Candidate of Technical Sciences Senior Research

Chief of Department of the Central Research

Institute of the Armed Forces of Ukraine,

Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-6477-3414>

Бойко Руслан Васильович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Національного університету оборони України
ім. Івана Черняхівського
<https://orcid.org/0000-0001-7240-4299>

Ruslan Boyko

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Lead Researcher of the National University
of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7240-4299>

Коркін Олександр Юрійович

ад'юнкт
Військової академії
Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8462-4512>

Oleksandr Korkin

Doctoral Student
of Military Academy,
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8462-4512>

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОТКАЗНОСТИ
НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЗЦА БОЕВОЙ ТЕХНИКИ**

М.А. Слюсаренко, О.М. Семененко, Р.В. Бойко, А.Ю. Коркін

В статье авторами предложен усовершенствованный процесс определения и обоснования параметров безотказности на этапе проектирования образца боевой техники. Рассматриваются причины несоответствия между безотказностью техники, которая заявлена в формуляре и той, что наблюдается при эксплуатации. Одной из причин низкой надежности (безотказности) техники являются недостатки формирования показателей безотказности на этапе проектирования. При обосновании безотказности в техническом задании очень важно правильно определить вероятность безотказной работы, наработку на отказ (до отказа) и время непрерывной работы. Рассмотрен вопрос выбора вида функции распределения времени безотказной работы в зависимости от условий эксплуатации образца техники и также от особенностей ее конструкции. Анализ заводских и полигонных испытаний техники говорит о том, что существует несоответствие, которое возникает между необходимой безотказностью образцов техники и значительно низкой безотказностью этих образцов, которая наблюдается при эксплуатации. Одной из причин такого расхождения являются недостатки методов математического моделирования процесса безотказной работы образцов техники какие существуют сегодня, как на стадии их проектирования, так и в ходе испытаний. Методы, которые используют сегодня не всегда учитывают самые главные факторы, которые влияют на состояние этих образцов в определенных условиях применения. Для того, чтобы уменьшить это расхождение предложен способ моделирования параметров безотказности на этапе проектирования образца техники. В исследовании использованы основные положения теории надежности.

Ключевые слова: безотказность техники, вероятность безотказной работы, наработка на отказ (до отказа), время безотказной работы, функция распределения времени безотказной работы, проектирование образца техники.

**DETERMINATION AND JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS
OF CERTAINABILITY AT THE STAGE OF DESIGNING A SAMPLE OF COMBAT TECHNIQUE**

M. Sliusarenko, O. Semenenko, R. Boyko, O. Korkin

In the article, the authors proposed an improved process for determining and justifying the reliability parameters at the design stage of a combat vehicle model. The reasons for the discrepancy between the reliability of the equipment that is stated in the form and that observed during operation are considered. One of the reasons for the low reliability (dependability) of technology is the disadvantage of the formation of reliability indicators at the design stage. When justifying the reliability in the technical task is very important to correctly determine the probability of failure-free operation, time between failures (to failure) and the time of continuous operation. The question of choosing the type of distribution function of the uptime, depending on the operating conditions of the sample equipment and also on the features of its design, is considered. Plant and providing ground equipment analysis shows there is no correspondence that appears between the necessary reliability of equipment and much lower reliability level of the equipment while its exploitation. One of the reasons of such divergence is lack of mathematical modelling methods in the process of reliability work that exist today both at the stage of their projecting and while testing. Methods that are used at present not always take into account the main factors that have an influence on these equipment conditions at the curtain conditions of use. With the purpose of this divergence decreasing we suggest the way of modelling reliability parameters at the stage of military equipment projecting. Main situation of reliability theory is used in the research.

Keywords: equipment reliability, connectivity, probability of reliability work reliable period of work, operating time to failure (operating time between failures), the law of regulation time of reliability work, design engineering sample.