УДК 681.396.6

В. В. Кузавков

А. В. Ланко

ІНЖЕНЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ОЦІННЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглянуто розрахунок класичних показників надійності радіоелектронного обладнання та запропоновано методи співставлення цих показників з інженерними характеристиками об'єкта контролю. Надано практичні рекомендації для обслуговуючого персоналу з оцінювання надійності радіоелектронного обладнання на основі інженерних характеристик об'єкта контролю. Методики придатні для зразків радіоелектронного обладнання іноземного походження, яке постачається без технічної документації та відомостей про умови виготовлення, збереження і випробування. Вони можуть застосовуватися в секторі безпеки та оборони України для інтеграції отриманого озброєння в діючу систему ремонту та технічного обслуговування.

К л ю ч о в і с л о в а: надійність, інженерна методика, радіоелектронне обладнання, показники надійності, вібростійкість, параметрична надлишковість, структурна надлишковість.

Постановка проблеми. Особливої уваги при отриманні та використанні радіоелектронного обладнання (РЕО) у секторі безпеки та оборони держави набувають питання його інтеграції в існуючу систему технічного обслуговування та ремонту. Відсутність (обмеженість) супровідної технічної документації від виробника, відсутність систем контролю та методик застосування цих систем значно знижують ефективність використання отриманого обладнання.

Чи не єдиним шляхом підтримання надійності та ефективності такого РЕО є удосконалення існуючої системи збирання, оброблення та аналізу інформації про його технічний стан. Класичні показники надійності: ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, середній наробіток до відмови $T_{\text{сер}}$, інтенсивність відмов λ та коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}$, традиційно оцінюються через тести або статистичний аналіз. Однак в умовах, коли обслуговуючий персонал обмежений у отриманні вихідної інформації від виробника і може лише аналізувати структуру РЕО, оцінка надійності базується на інженерних характеристиках, як-от: вібростійкість, структурна та параметрична надлишковість та довговічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінювання надійності РЕО досліджувалось у низці праць [1–9]. Показники надійності електронної апаратури, які є результатом механічних напружень, що виникають у процесі експлуатації в елементах конструкції під дією зовнішніх вібраційних та ударних впливів, розглянуто у статті [1].

Основні характеристики показників надійності радіоелектронних засобів, методи їх розрахунку наведено у статті [2]. У статті [3] запропоновані математичні моделі для визначення параметрів теплового поля та одержані аналітичні рішення для розрахунку температур у мікрозбірках, які враховують відведення теплоти від усіх поверхонь пластини-основи до оточуючого її об'єму. Авторами праці [4] встановлено, що надлишковість, яка широко застосовується для забезпечення нормального функціонування складних систем у реальних умовах експлуатації, є фундаментальним поняттям загальної теорії й практики надійності.

У міжнародних джерелах наведено формули та дані для розрахунку інтенсивності відмов компонентів з урахуванням умов експлуатації [10]. Існують також рекомендації щодо розроблення, випробувань, оцінювання та підтримання надійності РЕО і систем протягом усього їхнього життєвого циклу [11].

Проведений аналіз показав, що надання практичних рекомендацій з метою покращення показників надійності або параметрів радіоелектронного обладнання є доцільним. Однак автори не знайшли

© В. В. Кузавков, А. В. Ланко, 2025

публікацій, у яких розглянуто оцінювання надійності РЕО через інженерні характеристики об'єкта контролю (ОК). Отже, запропонований підхід є актуальним.

Метою статті є співставлення інженерних характеристик РЕО з класичними показниками надійності та розроблення рекомендацій для інженерно-технічного складу з оцінювання надійності зразків РЕО в умовах обмеженої вхідної інформації.

Виклад основного матеріалу. Ефективність функціонування РЕО визначається низкою факторів, серед яких важливу роль відіграє надійність – властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах функціонування [5]. Це комплексна властивість, яка залежно від призначення об'єкта і умов його застосування включає в себе низку показників (одиничних та комплексних).

До одиничних показників відносять: безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність і збережуваність.

Комплексними показниками є: коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання, коефіцієнт оперативної готовності.

Розглянемо більш детально властивості цих показників.

Властивість безвідмовності об'єкта характеризують такі показники: ймовірність безвідмовної роботи, щільність розподілу напрацювання до відмови, середнє напрацювання до відмови, інтенсивність відмов, параметр потоку відмов.

Властивість ремонтопридатності об'єкта характеризується показниками ймовірності відновлення у заданий час, щільності розподілу часу відновлення, середнього часу відновлення, інтенсивністю відновлення.

Властивість довговічності характеризується показниками гамма-відсоткового ресурсу, гамма-відсоткового терміну служби, середнього ресурсу, середнього терміну служби.

Властивість збережуваності характеризується гамма-відсотковим терміном збереження і середнім терміном зберігання.

Розглянемо кількісні показники об'єктів, що не відновлюються. Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ – це ймовірність того, що в межах заданого напрацювання t відмова об'єкта неможлива. Ймовірність безвідмовного функціонування об'єкта контролю (ОК) визначається виразом

$$P(t) = P\{T \geq t\}, t \geq 0.$$

Цей вираз означає, що випадкове напрацювання T не менше заданого значення напрацювання t.

Ймовірність протилежної події є ймовірність відмови об'єкта $Q(t)$ – це ймовірність того, що об'єкт зупиниться (вийде з ладу) в межах заданого напрацювання t, тобто

$$Q(t) = P\{T \leq t\}, t \geq 0.$$

Отже, сумарна ймовірність двох подій дорівнює 1:

$$P(t)+Q(t)=1.$$

Характерний тренд зміни значення ймовірностей $P(t)$ та $Q(t)$ від часу напрацювання ОК показаний на рис. 1.

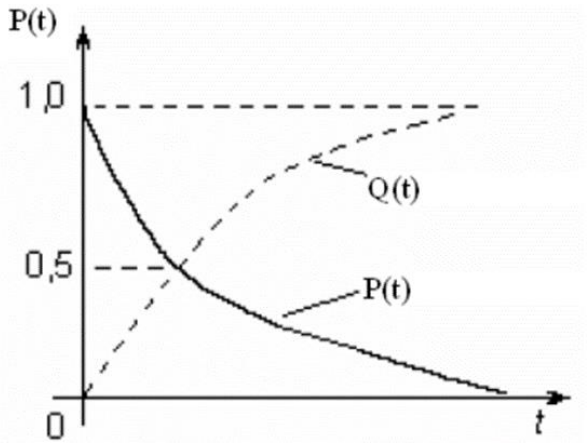

Рисунок 1 – Вигляд кривих $P(t)$ та $Q(t)$

Розглянемо порядок визначення $P(t)$ та $Q(t)$. На практиці значення цих показників можна знайти за статистичними даними про відмови об'єкта, отримані в результаті його випробувань на безвідмовність. У такому випадку визначаються наближені значення показників, які називають статистичними оцінками:

$$P(t) = \frac{N(t_i)}{N_0}, \tag{1}$$

де $N(t_i)$ – кількість справних об'єктів, які продовжували працювати без відмов до моменту часу t;

N_0 – загальна кількість об'єктів, які були в роботі (або випробуванні) у момент часу (t=0).

Якщо процес виникнення відмов однорідний, то із збільшенням N_0 і одночасному зменшенні t аналогічно можна визначити статистичну оцінку ймовірності відмови:

$$Q(t) = \frac{N_0 - N(t_i)}{N_0} = 1 - \frac{N(t_i)}{N_0} = 1 - P(t). \tag{2}$$

Щільність розподілу напрацювання до відмови (диференціальний закон розподілу напрацювання до відмови) є похідною від імовірності відмови і має такий вигляд:

$$f_T(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{d\,P(t)}{dt}. \tag{3}$$

Тому справедливе визначення: щільність розподілу напрацювання до відмови $f_T(t)$ можливо визначити як безумовну ймовірність виникнення відмови на нескінченно малому проміжку часу (t, t+Δt), віднесену до величини цього інтервалу.

На рис. 2 наведено щільність розподілу ймовірностей $P(t)$ і $Q(t)$.

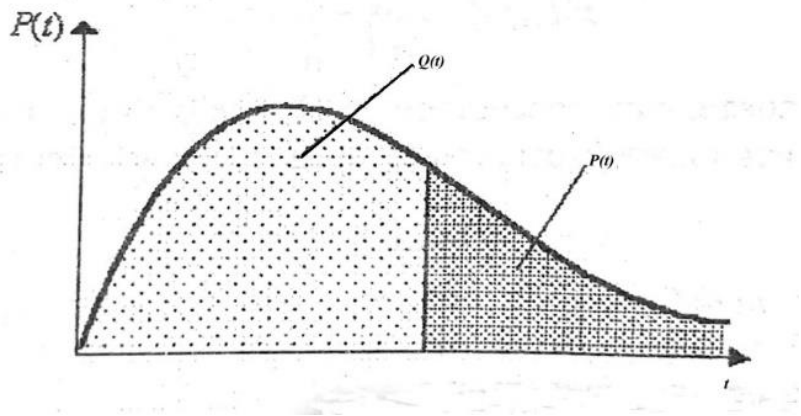

Рисунок 2 – Щільність ймовірностей P(t) та Q(t)

Статистичну оцінку щільності розподілу визначають за формулою

$$f_T(t_i) = \frac{Q(t_i + \Delta t) - Q(t_i)}{\Delta t}, \tag{4}$$

де t_i дискретне значення напрацювання, кратне Δt.

Скориставшись формулою (2), можна отримати

$$f_T(t_i) = \frac{N(t_i) - N(t_i + \Delta t)}{N_0 \Delta t} = \frac{n(t_i, t_i + \Delta t)}{N_0 \Delta t}, \tag{5}$$

де $n(t_i, t_i+\Delta t)$ – кількість об'єктів, які потрапили у проміжок напрацювання (t_i,t_i+Δt).

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – є відношенням щільності розподілу напрацювання до відмови до ймовірності безвідмовної роботи виробу для одного і того ж моменту часу. Відповідно до визначення

$$\lambda(t) = \frac{f_t(t)}{P(t)} = \frac{1}{1 - Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (6)$$

Після інтегрування рівняння (6) отримаємо

$$\int_0^t \lambda(x)dx = -\int_0^t \frac{dP(x)}{P(x)} = -\ln P(t). \quad (7)$$

Звідки виходить

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}. \quad (8)$$

Цей важливий вираз часто називають узагальненим законом надійності.

Умовна ймовірність безвідмовної роботи під час напрацювання $P(t_1, t_2)$, знайдена за припущення, що при t_1 об'єкт був працездатний, визначається з урахуванням виразу (8) за формулою

$$P(t_1, t_2) = exp\left(-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(x)dx\right). \quad (9)$$

Через інтенсивність відмов (8) можна також виразити щільність напрацювання до відмови:

$$f_T(t) = \lambda(t)_{e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}}. \quad (10)$$

Середнє напрацювання до відмови – це математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови:

$$\mathrm{T_{сер}} = \mathrm{M}[T] = \int t f_t(t)dt\ , \quad (11)$$

де M – математичне сподівання.

Статистична оцінка середнього напрацювання до відмови визначається як середнє арифметичне:

$$\mathrm{T_{сер}} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_i\ , \quad (12)$$

де T_i – напрацювання до відмови i-го об'єкта (i=1, 2, …, N_0).

Комплексні показники більшою мірою враховують тільки дві одиничні властивості показників надійності – безвідмовність і ремонтопридатність (коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання та коефіцієнт оперативної готовності).

Коефіцієнт готовності – це ймовірність того, що об'єкт буде в працездатному стані у довільний момент часу, крім планових періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається.

Відповідно до цього в кожний довільний момент часу, коли він повинен застосовуватись за призначенням, він може знаходитись в одному з двох станів: працездатному або не працездатному.

Значення коефіцієнта готовності можна знайти за виразом

$$\mathrm{K_Г} = \frac{\mathrm{T_\Sigma}}{\mathrm{T_\Sigma} + \mathrm{t_\Sigma}}\ , \quad (13)$$

де $\mathrm{T_\Sigma}$ – сумарне напрацювання за розглянутий календарний період;

$\mathrm{t_\Sigma}$ – сумарний час відновлення об'єкта за той самий період.

Показник $\mathrm{K_Г}$ характеризує відповідно частку працездатних об'єктів із загальної кількості об'єктів N_0, тобто

$$\mathrm{K_г} = \frac{N_г}{N_0}\ , \quad (14)$$

де $N_г$ – кількість працездатних об'єктів у момент часу t та кількість працездатних об'єктів у заданому режимі експлуатації (при $t \to \infty$).

Коефіцієнт технічного використання може застосовуватись до об'єктів, які в процесі функціонування у довільний момент часу знаходяться в одному з трьох станів: працездатному (використовуватись за призначенням), працездатному (технічне обслуговування), не працездатному (відновлення працездатності).

Значення коефіцієнта технічного використання $К_{ТВ}$ визначається таким виразом:

$$К_{ТВ} = \frac{t_k + t_{То\Sigma} + t_{P\Sigma}}{t_k}, \quad (15)$$

де t_k – розглянутий період експлуатації;

$t_{То\Sigma}$ – сумарний час простоїв об'єкта на технічному обслуговуванні за період;

t_k, $t_{Р\Sigma}$ – сумарний час перебування об'єкта в працездатному і не працездатному станах за період t_k.

Зазначимо, що, розраховуючи коефіцієнт технічного використання, необхідно враховувати затрати часу на всі види технічного обслуговування і ремонту.

Розглянуті показники: коефіцієнт готовності та коефіцієнт технічного використання, є середніми для тривалого часу експлуатації об'єкта. Часто цього виявляється недостатньо, оскільки виникає необхідність оцінювання можливості виконання об'єктом деяких задач, які потребують безперервної та безвідмовної роботи протягом заданого часу. Для кількісного оцінювання такої можливості введений спеціальний показник – коефіцієнт оперативної готовності $К_{ог}(t, t_0)$, який визначається як імовірність того, що об'єкт буде у працездатному стані в довільний момент часу, крім планових періодів, протягом яких застосування його за призначенням не передбачене, і, починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно на заданому проміжку часу t_0.

Отже, коефіцієнт оперативної готовності – це ймовірність сумісного здійснення двох подій:

– об'єкт виявиться працездатним у довільний момент t;

– він працюватиме безвідмовно протягом деякого часу $(t, t+t_0)$.

Коефіцієнт оперативної готовності визначається таким виразом:

$$К_{ог}(t_0) = \frac{N_{бг}(t_0)}{N_0}, \quad (16)$$

де $N_{бг}(t_0)$ – кількість об'єктів, які залишилися боєздатними до кінця операції з часом t_0;

N_0 – кількість однотипних об'єктів РЕО.

Отже, отримання чисельних значень розглянутих показників надійності РЕО можливе за наявності даних про експлуатацію чи випробування.

У діючих умовах (обмеженість вхідної інформації про ОК) перспективним напрямом визначення показників надійності є використання інженерних характеристик, які можуть слугувати основою оцінювання надійності об'єкта контролю.

Інженерні характеристики відображають здатність радіоелектронної апаратури протистояти відмовам. Розглянемо деякі з них, як-от: вібростійкість, структурну та параметричну надлишковість, довговічність, а також їх вплив на надійність ОК.

Вібростійкість визначає здатність радіоелектронного обладнання витримувати механічні вібрації без втрати функціональності. Вібрації є поширеною причиною відмов, особливо в радіоелектронній апаратурі, яку застосовують у секторі безпеки та оборони. Вони можуть спричинити розриви контактів чи механічні пошкодження. Висока вібростійкість знижує інтенсивність відмов λ, що підвищує $P(t)$ та $T_{сер}$. Тобто системи з амортизаційними матеріалами чи міцним кріпленням мають меншу ймовірність відмов через вібрації.

Структурна надлишковість передбачає наявність додаткових компонентів чи шляхів, які забезпечують функціонування системи у випадку відмови основних елементів, наприклад, дублюючі мікросхеми або резервні лінії живлення. Надлишковість підвищує системну надійність, дозволяючи системі працювати після відмови окремих компонентів. Це підвищує значення $P(t)$ та $К_г$.

Параметрична надлишковість інтерпретується як наявність запасу міцності чи додаткової гнучкості у параметрах системи (наприклад, компоненти з вищими характеристиками, ніж це необхідно, або можливість налаштування параметрів для компенсації деградації). Запас міцності дозволяє системі працювати навіть у разі деградації чи відхилень параметрів, що знижує λ і підвищує $T_{сер}$ та $P(t)$. Наприклад, резистор із номіналом 10 Ом замість необхідних 5 Ом має запас, що підвищує надійність.

Довговічність – це здатність системи працювати тривалий час без значного зносу чи відмов. Вона залежить від матеріалів, конструкції та умов експлуатації. Довговічні системи мають вище $T_{сер}$ і нижчу λ, оскільки вони менш піддаються зношенню. Показник довговічності безпосередньо впливає на загальну надійність системи.

Зв’язок інженерних характеристик системи з показниками надійності подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Зв’язок інженерних характеристик системи з показниками надійності

Характеристика	Показники надійності	Методи оцінювання	Вплив на надійність
Вібростійкість	$P(t)$, $T_{сер}$, λ	огляд кріплень, амортизаторів, ознак зносу	знижує λ, підвищує $P(t)$та $T_{сер}$
Структурна надлишковість	$P(t)$, $К_г$	виявлення дублюючих компонентів, аналіз схем	покращує $P(t)$ та $К_г$
Параметрична надлишковість	$P(t)$, $T_{сер}$, λ	перевірка специфікації, налаштованості	знижує λ, підвищує $P(t)$ та $T_{сер}$
Довговічність	$T_{сер}$, λ	оцінювання матеріалів захисних покриттів	підвищує $T_{сер}$ та знижує λ

Оскільки обслуговуючий персонал обмежений у своїх діях з аналізу і визначення надійності щойно отриманої техніки (виконуються тільки візуальний огляд та аналіз структури), надамо методику (послідовність) оцінювання надійності на основі інженерних характеристик.

1. Візуальний огляд.

Вібростійкість: оцінювання амортизаційних матеріалів, міцності кріплень, відсутності тріщин (шпарин) чи деформацій.

Структурна надлишковість: виявлення дублюючих компонентів (наприклад, кілька мікросхем одного типу) чи паралельних з’єднань.

Параметрична надлишковість: визначення компонентів з вищими (кращими) або неоптимальними параметрами (наприклад, за напругою чи потужністю).

Довговічність: Оцінювання якості електротехнічних матеріалів (наприклад, нержавіюча сталь, захисні покриття) та відсутності корозії або зносу.

2. Аналіз документації.

Перевірка технічних специфікацій на відповідність стандартам (наприклад, MIL-HDBK-217 для РЕК).

Вивчення схем на наявність надлишковості чи запасів міцності.

Аналіз матеріалів і конструкції за стандартами довговічності.

3. Застосування неруйнівних методів контролю.

Використання ультразвукового контролю для виявлення мікротріщин чи дефектів.

Застосування портативних акселерометрів для оцінювання вібростійкості.

Безконтактна перевірка електричних параметрів (опору, струму, напруги власного випромінення) для оцінювання запасу міцності.

Наведемо приклад застосування інженерних параметрів (методик) для оцінювання ступеня надійності ОК.

Оцінювання вібростійкості. Під час огляду виявлено наявність гумових амортизаторів та міцні кріплення.

Оцінка: висока вібростійкість знижує ймовірність механічних відмов, що може зменшити λ (наприклад, з 0,005 відмови/10^6 год до 0,003 відмови/10^6 год), підвищуючи $T_{сер}$.

Оцінювання структурної надлишковості. У РЕО виявлено два паралельних джерела живлення.

Оцінка: якщо кожне джерело має $P(t)=0,9$, то системна $P(t)=1-(1-0,9)(1-0,9)=0,99$, що значно підвищує надійність.

Оцінювання параметричної надлишковості. Наприклад, конденсатор фільтра має номінал 50 мкФ, хоча потрібний коефіцієнт пульсацій в системі можливо забезпечити при значенні 25 мкФ.

Оцінка: запас міцності знижує ймовірність відмови через перенапругу, підвищуючи $T_{сер}$.

Оцінювання довговічності. Наприклад, корпус РЕО виконано з нержавіючої сталі з герметичним покриттям.

Оцінка: висока стійкість до корозії підвищує $T_{сер}$, наприклад, до 300 000 год.

Висновки

Класичні показники надійності можливо оцінювати через низку інженерних характеристик РЕО, як-от: вібростійкість, структурну та параметричну надлишковість, довговічність. Для обслуговуючого персоналу, який обмежений візуальним оглядом та аналізом структури, ключовими є:

– виявлення ознак вібростійкості (амортизатори, міцні кріплення);

– пошук надлишковості (дублюючі компоненти, запас міцності);

– оцінювання довговічності через якість матеріалів; використання діючих стандартів (наприклад, MIL-HDBK-217).

Запропонований підхід дозволяє оцінити надійність РЕО навіть за обмеженої вхідної інформації про ОК, забезпечуючи організацію технічного обслуговування.

Наступні дослідження можуть бути спрямовані на автоматизацію оброблення результатів довідкових даних про радіоелектронні компоненти та подальше створення інженерних методик, які визначатимуть окремі показники надійності.

Перелік джерел посилання

1. Зіньковський Ю. Ф., Уваров Б. М. Фактори, що визначають надійність електронної апаратури при дії механічних впливів. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2014. № 24. Т 5. С. 333–339.

2. Уваров Б. М., Нікітчук А. В. Визначення показників надійності радіоелектронних апаратів, що обумовлюються тепловими режимами. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. Київ, 2014. № 57. С 92–103.

3. Кузавков В., Романенко М., Болотюк Ю. Умови застосування методу власного випромінювання при вирішенні задач технічної діагностики напівпровідникових структур. *Інтелектуальні ІТ та робототехніка у сфері безпеки та оборони*. 2021. Т. 42. № 3. С. 55–62. DOI: https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-42-3-55-62.

4. Кузавков В. В., Михайлюк С. С., Погребняк С. В. Аналіз параметрів надійності об’єктів радіоелектронної техніки з надлишковістю. *Системи і технології зв’язку, інформатизації та кібербезпеки.* Київ, 2022. Т. 2, № 2. С. 15–20.

5. ДСТУ 3004:95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Вид. офіц. Київ, 1994. 124 с.

6. ДСТУ 3433:96. Надійність техніки. Моделі відмов. Вид. офіц. Київ, 1996. 46 с.

7. Основи теорії надійності та експлуатації радіоелектронних систем : навч. посіб. / Василишин В. І. Чечуй О. В., Женжера С. В., Глушко А. П. Харків : ХНУПС, 2018. 268 с.

8. Уваров Б. М. Автоматизація визначення показників механічної витривалості, теплових режимів та надійності радіоелектронних апаратів. *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування.* Київ, 2014. № 57. С. 111.

9. Коренівська О. Л., Бенедицький В. Б. Надійність, експлуатація та ремонт радіоелектронної та телекомунікаційної техніки : навч. посіб. Житомир : Житомирська політехніка, 2020. 185 с.

10. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment: A Practical Guide. U. S. Department of Defense. DOI: https://doi.org/10.1109/RMC.2008.4593457.

11. Reliability Program Handbook TAHB0009A. SAE International. DOI: https://doi.org/10.4271/TAHB0009A.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2025 р.

UDC 681.396.6

V. Kuzavkov, A. Lanko

ENGINEERING CHARACTERISTICS AND RELIABILITY ASSESSMENT OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

Typically, the reliability indicators of radio-electronic equipment (probability of failure-free operation, mean time to failure, failure rate, and availability factor) are assessed through tests or statistical analysis. However, in modern conditions, when dual-purpose technical systems of foreign manufacture with limited input information are used in the armed forces, it is not possible to qualitatively assess the degree of reliability of these samples. To solve this problem, it is proposed to rely on the engineering characteristics of armament samples, such as vibration resistance, structural and parametric redundancy, and durability. The article examines the calculation of classical reliability indicators for radio-electronic equipment and proposes methods for comparing these indicators with the engineering characteristics of the controlled object. Practical recommendations are provided for maintenance personnel on assessing the reliability of radio-electronic equipment based on the engineering characteristics of the controlled object. The use of the proposed approach allows for the assessment of radio-electronic equipment reliability using an appropriate methodology during visual inspection and analysis of the product's block diagram, determining the degree of vibration resistance, parametric redundancy, and durability. As a result, the subjectivity of assessments is reduced. The relevance of the work is due to the widespread use of foreign-made dual-purpose technical systems in the armed forces. In most cases, the manufacturer of such systems does not permit the repair of the provided equipment in another country. Therefore, the equipment user (maintenance personnel, engineering and technical staff) is forced to find ways to integrate the received equipment into the existing maintenance and repair system, and methods for assessing the reliability of such equipment. The methodologies are suitable for samples of foreign-origin radio-electronic equipment supplied without technical documentation and information on manufacturing, storage, and testing conditions. The results can be applied in the security and defense sector of Ukraine for the integration of received armaments into the current repair and maintenance system.

K e y w o r d s: reliability; engineering methodology; radio-electronic equipment; reliability indicators; vibration resistance; parametric redundancy; structural redundancy.

Кузавков Василь Вікторович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри побудови телекомунікаційних систем Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут.

https://orcid.org/0000-0002-0655-9759

Ланко Антон Вікторович – начальник факультету інформаційних технологій Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут.

https://orcid.org/0009-0001-1124-1526