

УДК 621.3.019.3

Ланко А. В. ORCID: 0009-0001-1124-1526 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Рибка Є. М. ORCID: 0009-0000-2578-0363 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВІБРОСТІЙКОСТІ

Зазвичай показники надійності радіоелектронного обладнання (ймовірність безвідмовної роботи, середній наробіток до відмови, інтенсивність відмов, коефіцієнт готовності) визначаються на основі результатів випробувань або статистичного аналізу експлуатаційних даних. Проте в сучасних умовах широкого використання технічних систем іноземного виробництва, для яких відсутня повна технічна документація та обмежений обсяг апріорної інформації, оцінювання надійності таких зразків традиційними методами є ускладненим.

Для розв'язання зазначеної задачі запропоновано використовувати непрямий підхід до оцінювання надійності, що базується на аналізі інженерних характеристик зразків озброєння та військової техніки, зокрема вібростійкості, структурної і параметричної надлишковості, довговічності елементної бази тощо.

Враховуючи, що для мобільного радіоелектронного обладнання, встановленого на рухомих носіях, механічні вібраційні впливи є одним із визначальних факторів деградації конструктивних елементів, у роботі основну увагу приділено оцінюванню надійності на основі аналізу вібростійкості об'єктів контролю.

Запропоновано фізичні та математичні моделі тримасових ієрархічних структур радіоелектронного обладнання, встановленого на рухомих об'єктах. На основі побудованих моделей виведено характеристичні рівняння для визначення власних частот коливань складних технічних систем, що дозволяє прогнозувати виникнення резонансних режимів та оцінювати їх потенційний вплив на експлуатаційну надійність.

Окрему увагу приділено аналізу національних і міжнародних нормативних документів у сфері оцінювання надійності радіоелектронного обладнання.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю інтеграції до системи технічного забезпечення Збройних Сил України та інших складових сектору безпеки і оборони значної кількості зразків іноземного виробництва, для яких відсутні формалізовані методики оцінювання надійності в умовах обмеженості вихідних даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для підтримки прийняття рішень під час організації технічного обслуговування, ремонту та прогнозування ресурсу зразків озброєння і військової техніки іноземного виробництва.

Ключові слова: надійність, радіоелектронне обладнання, показники надійності, вібростійкість, інженерні характеристики, коливальні процеси.

A. Lanko, Ye. Rybka. Reliability assessment of radio-electronic equipment by vibration resistance parameters

Reliability indicators of radio-electronic equipment (probability of failure-free operation, mean time to failure, failure rate, and availability factor) are traditionally determined based on test results or statistical analysis of operational data. However, under current conditions of extensive use of foreign-manufactured technical systems, for which complete technical documentation and sufficient a priori information are often unavailable, reliability assessment using conventional methods becomes significantly complicated.

To address this issue, an indirect approach to reliability assessment is proposed, based on the analysis of engineering characteristics of weapon and military equipment samples, including vibration resistance, structural and parametric redundancy, durability of the component base, and related parameters.

Considering that for mobile radio-electronic equipment installed on moving platforms, mechanical vibration loads constitute one of the dominant factors affecting degradation of structural elements and interconnections, particular attention in this study is given to reliability assessment through vibration resistance analysis of the monitored objects.

Physical and mathematical models of three-mass hierarchical structures of radio-electronic equipment mounted on mobile platforms are proposed. Based on these models, characteristic equations for determining the natural frequencies of complex technical systems are derived, enabling prediction of resonance conditions and assessment of their potential impact on operational reliability.

Special attention is paid to the analysis of Ukrainian national standards and international standards related to reliability assessment of radio-electronic equipment.

The relevance of this study is determined by the need to integrate a significant number of foreign-manufactured weapon and military equipment samples into the existing technical support system of the Armed Forces of Ukraine and other components of the security and defense sector, while formalized methods for reliability assessment of such systems under limited input data conditions remain absent.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their application for supporting decision-making in maintenance planning, repair organization, and service life prediction of foreign-manufactured weapon and military equipment.

Keywords: reliability, radio-electronic equipment, reliability indicators, vibration resistance, engineering characteristics, oscillatory processes.

Постановка проблеми. Надійність є одним з ключових експлуатаційних параметрів радіоелектронного обладнання (РЕО), що застосовується у секторі безпеки та оборони України. Рівень надійності РЕО визначається характеристиками елементної бази, а також прийнятими схемотехнічними та конструктивними рішеннями. З огляду на критичну роль РЕО у забезпеченні функціонування сучасних технічних систем, вимоги до його надійності постійно зростають.

Під надійністю технічного об'єкта розуміють його властивість зберігати у часі здатність виконувати задані функції в установлених режимах та умовах експлуатації. Для кількісного оцінювання надійності застосовуються показники: ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, середній наробіток до відмови ($T_{сер}$), інтенсивність відмов (λ) та коефіцієнт готовності ($KГ$). Традиційно зазначені показники визначаються за результатами випробувань або статистичного аналізу експлуатаційних даних.

Водночас у сучасних умовах до сектору безпеки та оборони України надходить значна кількість зразків РЕО іноземного виробництва, зокрема подвійного призначення, для яких часто відсутня повна супровідна технічна документація, засоби контролю технічного стану та формалізовані методики технічного обслуговування [1–4].

За таких умов інтеграція зазначених зразків у діючу систему технічного обслуговування і ремонту суттєво ускладнюється, а застосування традиційних статистичних методів оцінювання надійності стає неможливим або малоефективним.

Одним із доступних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання непрямих неруйнівних методів оцінювання надійності, що базуються на аналізі структури, конструктивного виконання та технологічних особливостей виготовлення об'єктів РЕО [5].

Таким чином, наявне протиріччя між необхідністю оцінювання надійності РЕО іноземного виробництва в процесі його експлуатації та відсутністю достатніх вихідних даних для застосування традиційних методів оцінювання. Це зумовлює актуальність розроблення неруйнівних методів оцінки надійності РЕО в умовах інформаційної невизначеності.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Завданню оцінки надійності РЕО присвячено значна кількість публікацій [6–9]. Суттєвий внесок у теорію надійності РЕО внесли такі вчені: Жердев М. К., Уваров Б. М., Зінковський Ю., Креденцер Б. П., Бабало Ю. А., Ленков С. В., Рижов Є. В., Сакович Л. М. та інші.

Важливість оцінки надійності РЕО доводять прийняття ряду Державних стандартів України (ДСТУ) [10–19], що регулюють оцінку, прогнозування та забезпечення надійності техніки та систем. Ці стандарти встановлюють вимоги до властивостей, закладених під час проектування (конструктивна надійність) та виготовлення, а також під час експлуатації.

Нові ДСТУ [15–19] замінюють старі стандарти в оборонній сфері. В них зберігаються посилання на загальні принципи [10], але деталізують окремі процеси.

У роботах [10–18] для оцінки показників надійності РЕО визначено необхідний набір вихідних даних про об'єкт контролю (ОК), а підхід визначення самої надійності ґрунтується на статистичній оцінці інформації, отриманої під час випробувань або експлуатації.

Застосування статистичних методів оцінювання надійності в умовах, коли обсяг даних недостатній для застосування класичних методів (наприклад, коли випробування не завершилися відмовою, або загальна кількість зареєстрованих відмов дуже мала), розглянуто в стандарті [19].

Аналіз наведених ДСТУ [10–19] доводить актуальність розробки щодо оцінки надійності РЕО в умовах обмеженої інформації.

Існування ДСТУ 8647:2016 [19] свідчить про те, що національний орган стандартизації визнав проблему оцінки надійності РЕО з обмеженою вхідною інформацією про ОК та вважає її важливою науковою задачею.

Узагальнення основних міжнародних стандартів [20; 21] оцінки надійності РЕО наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Міжнародні стандарти для оцінки надійності РЕО

Позначення	Назва (призначення)	Примітки
IEC 62308	Equipment reliability – Reliability assessment methods (Надійність обладнання. Методи оцінювання надійності)	Опис методів раннього оцінювання надійності на основі польових даних і даних випробувань компонентів і систем (подібний до [15])
IEC 61078	Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and boolean methods (Методи аналізу надійності. Діаграми надійності та Баєсівські методи)	процедури моделювання системи для розрахунку показників надійності

Слід зазначити, що є також міжнародні довідники [22; 23] у сфері РЕО та електроніки, які де-факто є міжнародними стандартами для прогнозування надійності на рівні компонентів, особливо коли інформація про ОК обмежена.

Довідник [22] використовується для прогнозування інтенсивності відмов (λ) кожного радіоелектронного компонента (РЕК) в РЕО, враховуючи зовнішні фактори (температуру, середовище та інше). Комерційним наступником довідника [22] є довідник [23], який застосовується для більш точного прогнозування надійності зразків РЕО подвійного призначення (наприклад, обладнання для мобільного зв'язку).

У роботі [24] доведено, що надлишковість, яка широко застосовується для забезпечення нормального функціонування складних систем у реальних умовах експлуатації, є фундаментальним поняттям у загальній теорії й практиці надійності.

Методологія прискорених випробувань дозволяє швидко оцінити час до відмови компонентів, піддаючи їх екстремальним, але контрольованим навантаженням [25].

Дослідження відмінностей між надійністю та живучістю в комунікаційних мережах проведено в [26].

Отже, проведений аналіз наукових публікацій доводить, що на відміну від класичної теорії надійності, де оцінку надійності визначають по статистичних даних про ОК, доводить необхідність створення нових підходів для оцінки надійності РЕО з обмеженою вхідною інформацією про ОК.

Мета статті полягає в обґрунтуванні підходу до оцінювання показників надійності РЕО за його динамічними параметрами шляхом розробки фізико-математичних моделей тримасових ієрархічних систем РЕО для прогнозування технічного стану апаратури в умовах вібраційних навантажень.

Виклад основного матеріалу

Аналіз сучасних підходів до оцінювання надійності РЕО та наукових праць у цій сфері свідчить, що недостатньо дослідженим залишається питання оцінювання надійності РЕО в умовах обмеженості або повної відсутності апріорної інформації про об'єкт контролю.

За таких умов інженерно-технічному персоналу доступні переважно непрямі методи аналізу технічного стану, зокрема: оцінювання ознак вібростійкості конструкції; визначення структурної та/або параметричної надлишковості; оцінювання потенційної інтенсивності відмов на основі аналізу елементної бази та якості матеріалів із використанням нормативних

моделей (наприклад, MIL-HDBK-217) [22]; застосування безконтактних неруйнівних методів контролю.

Зазначені інженерні характеристики опосередковано відображають здатність РЕО протистояти деградаційним процесам та відмовам у процесі експлуатації.

У роботі [29] авторами досліджено вплив основних інженерних характеристик, зокрема вібростійкості, структурної та параметричної надлишковості, а також довговічності конструкції, на показники надійності об'єктів контролю.

Зв'язок порівняння інженерних характеристик із показниками надійності представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Зв'язок порівняння інженерних характеристик із показниками надійності

Характеристика	Показники надійності	Методи оцінки персоналом	Вплив на надійність
Вібростійкість	$P(t), T_{сер}, \lambda$	Огляд кріплень, амортизаторів, ознак зносу	Знижує λ , підвищує $P(t)$ і $T_{сер}$
Структурна надлишковість	$P(t), Kz$	Виявлення дублюючих компонентів, аналіз схемотехніки	Підвищує $P(t)$ і Kz
Параметрична надлишковість	$P(t), T_{сер}, \lambda$	Аналіз специфікації, перевірка запасів за параметрами	Знижує λ , підвищує $P(t)$ і $T_{сер}$
Довговічність	$T_{сер}, \lambda$	Оцінювання матеріалів, покриттів, захисту від середовища	Підвищує $T_{сер}$, знижує λ

На основі проведеного аналізу встановлено, що серед розглянутих характеристик саме вібростійкість найбільшою мірою піддається формалізованому математичному опису та кількісному оцінюванню без необхідності втручання в конструкцію ОК. Це дозволяє розглядати її як базовий параметр для побудови непрямой моделі оцінювання надійності РЕО в умовах обмеженої вхідної інформації.

Розглянемо фізичну та математичну моделі коливальних процесів РЕО, встановленого на рухомих об'єктах, який впливає на інженерний показник вібростійкість. Використовуючи такі розрахунки, можливо визначити показники віброізоляції РЕО, яке змонтоване на рухомому об'єкті.

Слід зазначити, інженерний показник вібростійкість можна оцінювати як в комплексі з інженерними характеристиками, так і окремо.

Для оцінки працездатності в умовах дії вібрацій та ударів необхідно, насамперед, визначити власні частоти механічних коливань апаратури. У разі збігу цих частот із частотами зовнішніх впливів виникають резонансні явища – амплітуди коливань можуть стати неприпустимо великими, що призводить до порушення цілісності елементів конструкції та відмов РЕО. Тобто наявність на платах габаритних РЕК (наприклад, котушок індуктивності, радіаторів охолодження, конденсаторів та ін.) впливає на показник вібростійкості. Наявність габаритних РЕК може бути ідентифікована під час візуального аналізу конструкції, що дозволяє попередньо оцінити потенційне зниження вібростійкості.

Розрахункові оцінки таких частот математично досить складні: наприклад, для тримасової системи математична модель коливального процесу призводить до необхідності знаходження коренів алгебраїчних рівнянь 18-го ступеня.

Схематично модель трирівневого блока РЕО наведено на рисунку 1. В середині корпусу (блок 1), на відповідних опорних елементах, встановлюють осередки (блок 2) (зазвичай шасі з діелектрика з металевим каркасом) та функціональні вузли (ФВ) (блок 3) – мікроскладання і мікросхеми на шасі та платах.

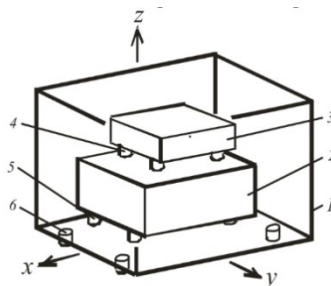


Рис. 1. Тримасова модель блока РЕО

При розміщенні на транспортних засобах, корпус (блок 1) кріплять до підлоги (стінки кабіни) на віброізоляторах (6). Шасі в корпусі блока встановлюють на опорних елементах (5), ФВ – на опорах (4).

Для розрахунку динамічних коливальних процесів фізичну модель системи «блок – шасі – ФВ» можна розглядати як систему з трьох фізичних тіл, з'єднаних пружними зв'язками з основою, а також між собою. В розрахунках необхідно враховувати переміщення відносно всіх трьох координатних осей, відповідні інерційні параметри та коефіцієнти жорсткості пружних зв'язків. Маса структурних елементів блока для всіх трьох осей однакові, проте моменти інерції відносно осей, як правило, різні; крім того, необхідно враховувати центробіжні моменти інерції. У більшості випадків різні й коефіцієнти жорсткості пружних елементів відносно осей, хоча вони й створюються тими самими віброізоляторами (для корпусу блока) або елементами кріплення (для шасі та ФВ).

Коливальні процеси характеризуються лінійними й обертальними переміщеннями. Тому фізичні моделі виходять досить складними. Наприклад, якщо розглядати переміщення для тримасової системи лише відносно однієї з осей (наприклад, осі X), отримаємо фізичну модель, наведену на рисунку 2 (J_1 – корпус блока, J_2 – шасі, J_3 – ФВ).

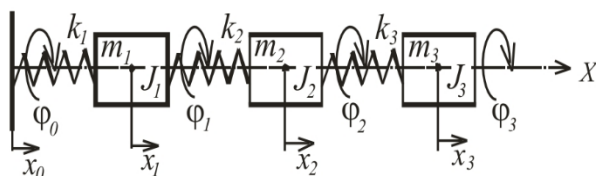


Рис. 2. Фізична модель тримасової системи

Інерційні параметри кожного з цих структурних елементів характеризуються масами m_i , моментами інерції J_i , пружними зв'язками з коефіцієнтами жорсткості k_i (m_1J_1 – корпус блока, m_2J_2 – шасі, m_3J_3 – ФВ).

Динамічний коливальний процес для такої системи має характеризуватися лінійними переміщеннями кожного елемента x_i та обертальними φ_i ; джерелом збурень будуть зміщення основи x_0 та φ_0 .

Для розрахунку характеристик коливального процесу можна використовувати однорідну (спрощену модель), якщо розглядати блок РЕО як абсолютно тверде тіло, встановлене на пружних зв'язках, а також розглядати лише лінійні або лише обертальні переміщення мас системи відносно певної осі.

Це стає можливо в тому випадку, коли сам блок і його структурні модулі повністю симетричні відносно центрів своїх мас, а центри жорсткостей їхніх віброізоляторів збігаються з центрами мас модулів.

У такій системі всі модулі здійснюють лінійні коливання вздовж осі, що проходить через центри мас (якщо основа блока також зміщується лінійно), або обертальні коливання навколо цієї осі (якщо основа зміщується обертально).

Для тримасової системи визначення характеристичної матриці $H_i = S - \omega^2 M$, що пов'язує інерційні характеристики структурних модулів M_i , коефіцієнти жорсткості пружних зв'язків S_i та частоти власних коливань мас ω , має вигляд (1):

$$|H_i| = \begin{vmatrix} S_{11} - \omega^2 M_{11} & S_{12} - \omega^2 M_{12} & S_{13} - \omega^2 M_{13} \\ S_{21} - \omega^2 M_{21} & S_{22} - \omega^2 M_{22} & S_{23} - \omega^2 M_{23} \\ S_{31} - \omega^2 M_{31} & S_{32} - \omega^2 M_{32} & S_{33} - \omega^2 M_{33} \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Якщо розглядати лише лінійні коливання для моделі (див. рис. 1), тоді: інерційні характеристики модулів – маси модулів – набувають значень:

$M_{11} = m_1; M_{22} = m_2; M_{33} = m_3; M_{12} = M_{13} = M_{21} = M_{23} = M_{31} = M_{32} = 0$, а коефіцієнти жорсткості пружних зв'язків (відповідно):
 $S_{11} = k_1 + k_3; S_{12} = S_{21} = -k_2; S_{13} = S_{31} = 0; S_{22} = k_2 + k_3; S_{23} = S_{32} = -k_3; S_{33} = k_3$.

Сам вираз (1) набуває вигляду:

$$\Delta = \begin{vmatrix} k_1 + k_3 - \omega^2 m_1 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 - \omega^2 m_2 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 - \omega^2 m_3 \end{vmatrix} = 0.$$

Розкриваючи вираз, отримаємо характеристичне рівняння (2) для визначення частот власних лінійних коливань уздовж осі X (2):

$$\theta^3 - \frac{k_{23}m_1 + k_3m_2}{m_1m_2} \theta^2 - \frac{k_3m_1 + (k_2^2 - k_{13}k_{23})m_3}{m_1m_2m_3} \theta + \frac{k_{13}k_3^2}{m_1m_2m_3} = 0, \quad (2)$$

де позначено: $\theta = \omega^2; k_{13} = k_1 + k_3; k_{23} = k_2 + k_3$.

Корені цього рівняння третього степеня для θ (усі додатні дійсні числа – квадрати власних частот структурних мас блока) (3):

$$\theta_1 = \sqrt[3]{-\frac{p}{3}} \cos \frac{\alpha}{2}; \theta_{2,3} = -2 \sqrt[3]{-\frac{p}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} \pm \frac{2\pi}{3} \right), \quad (3)$$

де $p = -\frac{\alpha^2}{3} + b$;

$$q = 2 \left(\frac{\alpha}{3} \right)^3 - \frac{ab}{3} + c;$$

$$\alpha = -\frac{m_2(k_3m_1 + k_{13}m_3) + k_{23}m_1m_3}{m_1m_2m_3};$$

$$c = \frac{k_{13}k_{23}k_3 - k_{13}k_3^2 - k_2^2k_3}{m_1m_2m_3};$$

$$b = \frac{k_3^2m_1 + k_2^2m_3 - k_{23}(k_3m_1 + k_{13}m_3) - k_3k_{13}m_2}{m_1m_2m_3}.$$

Власні частоти:

$$\omega_1 = \sqrt{\theta_1}; \omega_2 = \sqrt{\theta_2}; \omega_3 = \sqrt{\theta_3}. \quad (4)$$

Якщо в якості інерційних характеристик використовувати моменти інерції J_1, J_2, J_3 , а в якості коефіцієнтів жорсткості – обертові жорсткості k_{k1}, k_{k2}, k_{k3} , то аналогічним чином можна отримати вирази для власних частот крутильних коливань системи.

Слід враховувати, що «симетричних» реальних конструкцій блоків РЕО не існує, тому для кожного структурного елемента блока слід визначити координати центру мас, осьові та центробіжні моменти інерції, різні коефіцієнти жорсткості пружних зв'язків відносно координатних осей.

Як зазначено вище, для тримасової моделі система рівнянь має містити 18 диференціальних рівнянь (відповідно – 18 значень власних частот зв'язаних коливань).

Розглянемо приклад отримання системи диференціальних рівнянь коливального процесу для «простої» однорідної моделі.

Для диференціальних рівнянь руху однорідного фізичного тіла вихідним є рівняння Лагранжа у диференціальній формі (5):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i(\tau), i = 1, 2 \dots 6, \quad (5)$$

де T – кінетична енергія системи:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^6 \beta_{ik} \dot{q}_i \dot{q}_k;$$

Π – потенційна енергія системи:

$$\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^6 \alpha_{ik} q_i q_k;$$

\dot{q}_i – узагальнена швидкість; q_i – узагальнена координата; α_{ik} – узагальнені коефіцієнти жорсткості (одиничні реакції зв'язків у i -му напрямку при переміщенні системи у k -му напрямку); β_{ik} – узагальнені інерційні характеристики (маси й моменти інерції);

$Q_i(\tau)$ – узагальнена сила, що діє за i -тою координатою.

Припустимо, що блок розташований на віброізоляторах із коефіцієнтами жорсткості k_x, k_y, k_z , встановлених у точках із координатами x, y, z кожен. Тоді маємо систему з шістьма ступенями вільності. Коефіцієнти жорсткості такої системи мають вигляд:

– лінійні:

$$\alpha_{11} = \sum k_x; \alpha_{22} = \sum k_y; \alpha_{33} = \sum k_z;$$

– лінійно-поворотні:

$$\alpha_{15} = \sum k_x z; \alpha_{16} = -\sum k_x z; \alpha_{24} = -\sum k_x y;$$

$$\alpha_{26} = \sum k_y x; \alpha_{34} = \sum k_z y; \alpha_{35} = -\sum k_z x;$$

– гіроскопічні:

$$\alpha_{45} = -\sum k_z x y; \alpha_{46} = -\sum k_y z x; \alpha_{56} = -\sum k_x y z;$$

– обертові:

$$\alpha_{44} = \sum (k_y z^2 + k_z y^2); \alpha_{55} = \sum [(k_x) z^2 + k_x z^2]; \alpha_{66} = \sum (k_x y^2 + k_y x^2).$$

Схема лінійно-поворотних коефіцієнтів жорсткості наведена на рисунку 3.

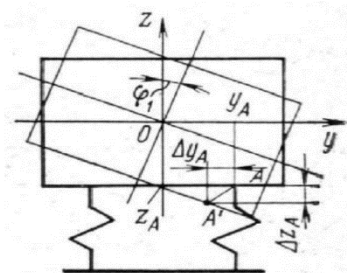


Рис. 3. Визначення лінійно-поворотного коефіцієнта жорсткості

Гіроскопічний коефіцієнт α_{45} – це момент M_2 пружної реакції P_z відносно осі Y, до кута повороту точки A навколо осі X:

$$\alpha_{45} = M_2 / \varphi_1 = k_z x_A y_A.$$

Із рисунка 4 слідує, що $x_A \varphi_2 = -y_A \varphi_1$, тому:

$$M_2 = P_z x_A = k_z \Delta z x_A = k_z x_A \varphi_2 x_A.$$

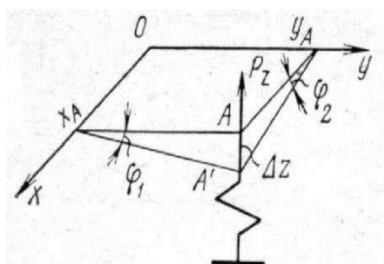


Рис. 4. Визначення гіроскопічного коефіцієнта жорсткості

Обертові коефіцієнти (наприклад, $\alpha_{44} = \frac{M_1}{\varphi_1}$) – це відношення моментів до кутів повороту, які вони викликають (рис. 5).

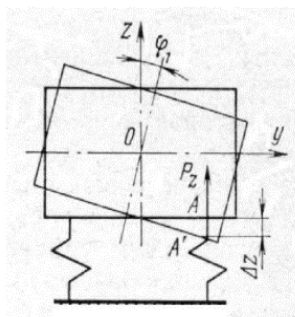


Рис. 5. Визначення обертового коефіцієнта жорсткості

Аналогічним чином визначають інші коефіцієнти жорсткості.

Математична модель коливального процесу для однорідної системи координат складається з шести рівнянь вільних лінійних і обертальних коливань блока (6):

$$\left. \begin{aligned} \beta_{11}\ddot{\delta}_1 + \alpha_{11}\delta_1 + \alpha_{15}\varphi_2 + \alpha_{16}\varphi_3 &= 0; \\ \beta_{11}\ddot{\delta}_2 + \alpha_{22}\delta_2 + \alpha_{24}\varphi_1 + \alpha_{26}\varphi_3 &= 0; \\ \beta_{11}\ddot{\delta}_3 + \alpha_{33}\delta_3 + \alpha_{34}\varphi_1 + \alpha_{35}\varphi_2 &= 0; \\ \beta_{44}\ddot{\varphi}_1 + \beta_{45}\ddot{\varphi}_2 + \beta_{46}\ddot{\varphi}_3 + \alpha_{24}\delta_2 + \alpha_{34}\delta_3 + \alpha_{44}\varphi_1 + \alpha_{45}\varphi_2 + \alpha_{46}\varphi_3 &= 0; \\ \beta_{45}\ddot{\varphi}_1 + \beta_{55}\ddot{\varphi}_2 + \beta_{56}\ddot{\varphi}_3 + \alpha_{15}\delta_1 + \alpha_{35}\delta_3 + \alpha_{45}\varphi_1 + \alpha_{35}\varphi_2 + \alpha_{56}\varphi_3 &= 0; \\ \beta_{46}\ddot{\varphi}_1 + \beta_{56}\ddot{\varphi}_2 + \beta_{66}\ddot{\varphi}_3 + \alpha_{16}\delta_1 + \alpha_{26}\delta_2 + \alpha_{46}\varphi_1 + \alpha_{56}\varphi_2 + \alpha_{66}\varphi_3 &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де δ_i – лінійні переміщення вздовж осей; φ_i – відповідні обертові переміщення; α_{ik} – узагальнені коефіцієнти жорсткості віброізоляторів; β_{ik} – узагальнені інерційні характеристики блока.

Для отримання характеристичної матриці слід прийняти часткові розв'язки (лінійні й поворотні зміщення блока) у вигляді (7):

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= A_1 \sin(\omega\tau + \alpha); \delta_2 = A_2 \sin(\omega\tau + \alpha); \delta_3 = A_3 \sin(\omega\tau + \alpha); \\ \varphi_1 &= A_4 \sin(\omega\tau + \alpha); \varphi_2 = A_5 \sin(\omega\tau + \alpha); \varphi_3 = A_6 \sin(\omega\tau + \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Після постановки виразу (7) у рівняння (6) отримаємо характеристичну матрицю, а з неї – детермінант подібний до (1), для знаходження частот коливань у вигляді:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} - \beta_{11}\omega^2 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{15} & \alpha_{16} \\ 0 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & 0 & \alpha_{24} & 0 & \alpha_{26} \\ 0 & 0 & \alpha_{33} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{34} & \alpha_{35} & 0 \\ 0 & \alpha_{24} & \alpha_{34} & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 \\ \alpha_{15} & 0 & \alpha_{35} & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 \\ \alpha_{16} & \alpha_{26} & 0 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 & \alpha_{22} - \beta_{11}\omega^2 \end{vmatrix} = 0.$$

Розкриваючи визначник, отримаємо частотне рівняння шостого степеня відносно ω^2 :

$$A\omega^{12} + B\omega^{10} + C\omega^8 + D\omega^6 + E\omega^4 + F\omega^2 + G = 0,$$

корені якого й будуть частотами коливань блока.

Аналіз діагональних одиничних визначників $\alpha_{ik} - \beta_{ik}\omega^2$ дає значення так званих простих частот, а недіагональних – зв'язаних.

Отримані значення власних частот коливань структурних елементів РЕО доцільно використовувати для аналізу умов його експлуатації в складі рухомих об'єктів. Зокрема, практичний інтерес становить порівняння спектрального складу зовнішніх вібраційних впливів із розрахованими власними частотами системи.

У разі наближення частот зовнішніх збурень до власних частот коливальних підсистем РЕО виникають резонансні режими, які характеризуються суттєвим зростанням амплітуд коливань. Це призводить до підвищення механічних напружень у конструктивних елементах, зокрема в з'єднаннях, кріпленнях та елементах друкованих плат, що, у свою чергу, прискорює процеси деградації та збільшує інтенсивність відмов.

Таким чином, ступінь наближення робочого спектра вібраційних навантажень до власних частот коливальної системи може розглядатися як якісний критерій оцінювання вібраційної небезпеки для РЕО. На цій основі можливе формування узагальненої експертної шкали впливу вібраційних режимів на експлуатаційну надійність РЕО (табл. 3).

Таблиця 3

Якісна оцінка впливу резонансної близькості на надійність РЕО

Умови експлуатації	Характер динамічного режиму	Вплив на надійність
Робочий спектр вібрацій суттєво віддалений від власних частот	Нерезонансний режим	Незначний
Робочий спектр частково перекривається з окремими власними частотами	Локальні резонансні явища	Помірне зростання інтенсивності відмов
Робочий спектр збігається з домінуючими власними частотами	Розвинений резонансний режим	Суттєве зростання інтенсивності відмов та зменшення ресурсу

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті проведеного дослідження встановлено, що традиційні підходи до оцінювання надійності РЕО базуються переважно на статистичних даних про відмови об'єктів контролю, що суттєво обмежує можливість їх застосування для зразків РЕО іноземного виробництва за умов відсутності або недостатності експлуатаційної інформації.

Показано, що представлення конструкції РЕО у вигляді фізичної багатомасової моделі дозволяє формалізувати вплив конструктивно-механічних характеристик структурно-конструктивних модулів і параметрів їхніх пружних зв'язків на вібраційну стійкість і, відповідно, на експлуатаційну надійність РЕО.

Обґрунтовано необхідність урахування як лінійних, так і кутових коливань структурно-конструктивних модулів при розрахунку динамічних характеристик реальних багатомасових систем, що підвищує адекватність математичного опису вібраційних процесів у складних ієрархічних конструкціях.

Запропонований підхід забезпечує можливість непрямого оцінювання впливу вібраційних навантажень на надійність РЕО, змонтованого на рухомих об'єктах, навіть за умов обмеженої вхідної інформації про об'єкт контролю, та може бути використаний для підтримки прийняття рішень щодо організації технічного обслуговування і підвищення ефективності віброзахисту.

Перспективи подальших досліджень полягають в експериментальній верифікації запропонованих моделей, розширенні підходу на багатофакторне оцінювання надійності з урахуванням теплових та електричних навантажень, а також у розробленні автоматизованих засобів підтримки прийняття рішень для технічного персоналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Постачання військової електроніки в Україну під час російського вторгнення. URL: <https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=>
2. Attack On Europe: Documenting Russian Equipment Losses During The 2022 Russian Invasion Of Ukraine // Oryx (last accessed: 08.02.2023).
3. Ukraine conflict: Netherlands to supply weapon locating radars to Ukraine // Janes.com (last accessed: 20.05.2022).
4. Заболотнюк І. О. Військово-технічна допомога США Україні у роки російсько-української війни (2014–2022): дис. на здобуття наук. ступеня канд. іст. наук. Львів: [Установа], 2025. 482 с. URL: https://chtyvo.org.ua/authors/Zabolotniuk_Ihor/Viiskovo-tekhnichna_dopomoha_SShA_Ukraini_u_roky_rosiisko-ukrainskoi_viiny_20142024.pdf.
5. Hanneko Y., Patsenko S. Analysis of the supply of international technical assistance to the Armed Forces of Ukraine // Social Development and Security. 2024. № 14 (6). P. 97–104. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.6.10>.

6. Сакович Л. М., Рижов Є. В., Небесна Я. Е., Вовк С. В. Модель кількісної оцінки значень показників надійності радіостанцій тактичної ланки управління // Військово-технічний збірник. 2019. № 20. С. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019>.
7. Жердев М. К. Фізичні основи теорії надійності: підруч. / М. К. Жердев, С. В. Ленков, Б. П. Креденцер. Київ: Нац. ун-т ім. Т. Шевченка. 2008. 215 с.
8. Коренівська О. Л., Бенедицький В. Б. Надійність, експлуатація та ремонт радіоелектронної та телекомунікаційної техніки: навч. посіб. Житомир: Житомирська політехніка, 2020. 185 с.
9. Уваров Б. М., Нікітчук А. В. Визначення показників надійності радіоелектронних апаратів, що обумовлюються тепловими режимами // Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2014. № 57. С 92–103.
10. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
11. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1994.
12. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Київ: Держстандарт України, 1994.
13. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання показників надійності. Київ: Держстандарт України, 1994.
14. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1996.
15. ДСТУ EN 62308:2022 (EN 62308:2006, IDT; IEC 62308:2006, IDT). Надійність обладнання. Методи оцінювання надійності. Київ: УкрНДНЦ, 2022.
16. ДСТУ В 15.010:2023. Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Керування надійністю. Київ: УкрНДНЦ, 2023.
17. ДСТУ В 15.201:2022. Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Тактико-технічне (технічне) завдання на виконання дослідно-конструкторської роботи. Загальні вимоги до побудови, змісту, викладення, оформлення, видання та коригування. Київ: УкрНДНЦ, 2022.
18. ДСТУ В 15.210:2023. Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Випробування озброєння та військової техніки. Класифікація. Київ: УкрНДНЦ, 2023.
19. ДСТУ 8647:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов. Київ: УкрНДНЦ, 2016.
20. IEC 62308:2006. Equipment reliability – Reliability assessment methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006.
21. IEC 61078:2016. Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and boolean methods. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016.
22. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment: A Practical Guide. U.S. Department of Defense. URL: <https://doi.org/10.1109/RMC.2008.4593457>.
23. Reliability Program Handbook TAHB0009A. SAE International. URL: <https://doi.org/10.4271/TAHB0009A>.
24. 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. 2022. Т. 2, № 2. С. 15–20.
25. Meeker W. Q. Accelerated life testing and reliability assessment of electronic components / W. Q. Meeker, L. A. Escobar. New York: Wiley, 2014. [X] p. DOI: 10.1002/9780470316715.
26. Chen T. A comprehensive review of reliability and resilience assessment in modern communication networks / T. Chen, Y. Gong, K. Zhang // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. [X–Y]. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3168868.
27. Кузавков В., Ланко А. Обґрунтування необхідності нового підходу визначення надійності радіоелектронного обладнання в умовах обмеженої вхідної інформації // Progressive Approaches in Science and Engineering: 2 Міжнародна науково-практична конференція. Copenhagen, Denmark. P. 672–673 (November 26–28, 2025.) URL: <https://isu-conference.com/en/archive/progressive-approaches-in-science-and-engineering-26-11-25>. DOI: <https://doi.org/10.70286/isu-26.11.2025>.

28. Кузавков В. В., Ланко А. В. Застосування безконтактного індукційного методу при визначенні показників надійності об'єкта контролю // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки, 2025. С. 65–73. DOI: 10.58254/viti.7.2025.06.65.

29. Кузавков В. В., Ланко А. В. Інженерні характеристики та оцінювання надійності радіоелектронного обладнання // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2025. № 2 (46). С. 57–64. URL: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/2/46/352571>.

Надійшла до редколегії 02.03.2026.

Схвалена до друку 22.05.2026.

Дата публікації 29.05.2026.