

УДК 623/4

М.В. Гудков

Миколаївський спеціалізований центр бойової підготовки авіаційних фахівців  
Збройних Сил України, Миколаїв

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ЗА СТАНОМ З КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРІВ

У статті запропонована методика оцінки прогнозу надійності радіоелектронного обладнання при експлуатації авіаційної техніки за станом з контролем параметрів. Методика заснована на апараті канонічних розкладів випадкових величин. Прогнозування здійснюється у три етапи. Насамперед, здійснюється канонічний розклад апріорного процесу, що досліджується. Після статистичної обробки отриманих випадкових коефіцієнтів канонічного розкладу здійснюється моделювання апостеріорного процесу. По отриманих реалізаціях апостеріорного процесу за методом Монте-Карло розраховується прогноз надійності.

**Ключові слова:** прогнозування надійності, радіоелектронне обладнання, канонічні розклади, випадкові функції, експлуатація за станом, авіаційна техніка.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Виникнення проблеми надійності радіоелектронного обладнання (РЕО) авіаційної техніки (АТ) обумовлено наступними причинами: зростанням складності; відставанням якості елементів радіоелектроніки від їх кількісного застосування; підвищенням відповідальності функцій виконання яких покладено на РЕО АТ (організація і управління повітряним рухом, навігація і поса-

дка повітряних судів, наведення і управління зброєю і т.ін.); складністю умов експлуатації.

Все це свідчить про те, що забезпечення підвищення рівня надійності роботи РЕО є важливим завданням експлуатації АТ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед різноманітних методів підвищення рівня надійності систем виділяють три великі групи: до експлуатаційні, виробничі та експлуатаційні [1, 5, 6], їх характеристики наведено у табл. 1

Таблиця 1

Характеристика методів підвищення надійності РЕО

Група	Назва	Заходи
до експлуатаційні (при проектуванні)	системні	обрання та обґрунтування принципів технічного обслуговування, вибір основного показника надійності, визначення норм надійності та розподіл їх по елементам, складання програми забезпечення надійності
	схемні	вдосконалення принципів побудування об'єктів
	конструктивні	створення та підбір елементів, створення сприятливих режимів роботи, прийняття заходів по полегшенню ремонту та ін.
виробничі		підвищення культури виробництва
		підвищення контролю якості
		кваліфікація персоналу
експлуатаційні	технічні	експлуатація систем на базі автоматизованих систем контролю
		комплексування (збір на одному носії) інформації про стан комплексу апаратури
		введення систем автоматизованого діагностування (встановлення місця несправності)
	організаційні	чітка організація ремонтно-профілактичних заходів
		реалізація прогноуючого контролю, який дозволяє передбачити можливу відмову
		організація експлуатації за станом з контролем рівня надійності, або з контролем параметрів на відміну від існуючих у теперішній час регламентних способів обслуговування

Аналіз наведених методів підвищення рівня надійності експлуатації, проведені розрахунки і закордонна практика свідчать, що при впровадженні

експлуатації за станом можна одержати скорочення витрат на 30% та найбільш перспективною є експлуатація за станом з контролем параметрів [5].

Основним положенням такого методу експлуатації є контроль параметрів АТ і по його результатах здійснення прогнозу стану АТ з прийняттям рішення про подальшу експлуатацію (допуск до польоту, потребу у регламенті або ремонті і т.ін.) [1, 5]. При визначенні стану АТ знаходять застосування різноманітні методики прогнозування, такі як методи аналітичного прогнозування, методи засновані на імовірнісному підході, методи розпізнавання образів [2].

Однією з таких методик є апарат канонічних розкладів випадкових функцій, який може бути застосований при слабких обмеженнях, що накладаються на клас випадкових процесів які досліджуються, а це у свою чергу, забезпечує достатню загальність результатів які отримують.

**Формулювання мети статті.** Експлуатація за станом з контролем параметрів передбачає отримання вихідних статистичних даних про випадковий процес експлуатації  $X(t)$  елементів РЕО АТ, як сукупності  $L$  експериментально знятих реалізацій  $x_1(t_i)$   $i = \overline{1, L}$  цього процесу, значення яких отримано у результаті вимірювань у дискретні моменти часу  $t_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ . На підставі вихідних даних та застосування апарату канонічних розкладів випадкових функцій потрібно розробити методику прогнозування надійності функціонування елемента РЕО АТ.

**Викладення основного матеріалу**

В основу ідеї канонічних розкладів положено факт, що безперервну випадкову функцію можна записати порівняно простою і зручною для практичного застосування лінійною аналітичною моделлю

$$X(t) = At + B, \tag{1}$$

де  $A$  та  $B$  випадкові (у загальному випадку залежні) коефіцієнти.

Виходячи з того, що розділення у моделі двох особливостей випадкової функції надає значні практичні переваги, доцільним є спроба виразити випадкову функцію, що досліджується,  $X(t)$  через деяку сукупність скалярних випадкових величин  $V_v$ ,  $V_v$ ,  $v = 1, 2, \dots$ .

Самою простою формою такого виразу є її представлення у вигляді лінійної комбінації

$$X(t) = m_x(t) + \sum_{v=1}^{\infty} V_v \phi_v(t), \tag{2}$$

де  $V_v$  – деякі довільні, некорельовані між собою випадкові величини з математичним сподіванням, яке дорівнює нулю, та кінцевою дисперсією коефіцієнти

$$M[V_v] = 0; \quad M[V_v^2] = D_v; \quad M[V_v, V_\mu] = 0; \tag{3}$$

$\mu \neq v; \quad v = 1, 2, \dots,$

а  $\phi_v(t)$ ;  $v = 1, 2, \dots$  – деякі невідповідні функції аргументу  $t$ .

Із використанням (2) випадкова функція  $X(t)$ , що досліджується, набуває вигляду суми математичного сподівання  $m_x(t)$  та додатків виду  $V_v \phi_v(t)$ , так званих, елементарних випадкових функцій. [2].

Академіком В.С. Пугачовим [3] запропонований варіант канонічного розкладу, який базується на тім факті, що простішим видом випадкових величин, які корельовані з даною випадковою функцією  $X(t)$  та мають нульові математичні сподівання, є лінійні комбінації значень центрованої випадкової функції  $\overset{\circ}{X}(t)$ , що відповідають різним значенням аргументу  $t$ .

Загальний алгоритм отримання елементів канонічного розкладу, з урахуванням вищезазначеного факту, у достатньо простій рекурентній формі набуває вигляду [2]

$$V_1 = \overset{\circ}{X}(t_1);$$

$$V_i = \overset{\circ}{X}(t_i) - \sum_{v=1}^{i-1} V_v \phi_v(t_i); \quad i = 2, 3, \dots; \tag{4}$$

$$D_1 = D_x(t_1);$$

$$D_i = D_x(t_i) - \sum_{v=1}^{i-1} D_v \phi_v^2(t_i); \quad i = 2, 3, \dots; \tag{5}$$

$$\phi_v(t_i) = \frac{1}{D_v} M[V_v \overset{\circ}{X}(t_i)]; \quad i = 1, 2, \dots \tag{6}$$

Послідовне використання цього алгоритму надає канонічний розклад випадкової функції  $X(t)$  у вигляді

$$X(t) = m_x(t) + \sum_{v=1}^i V_v \phi_v(t), \quad t \geq t_i, \quad i = \overline{1, I}. \tag{7}$$

Для моделювання випадкового процесу, який заданий своїм канонічним розкладом, необхідно забезпечити моделювання значень випадкових коефіцієнтів  $V_v$  із заданими законами розподілу. Ці закони апріорно невідомі та характеризуються масивами значень  $v_{il}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $l = \overline{1, L}$ , де  $L$  – кількість виробів,  $I$  – кількість вимірювань. Для оцінки невідомої функції розподілу досить непогані результати дають непараметричні методи оцінки парзеновського типу, одним з яких є метод прямокутних вкладів [4].

При цьому оцінка щільності розподілу  $f_1(v)$  випадкової величини  $V$  по  $L$  її реалізаціям набуває вигляд

$$f_1(v) = \frac{1}{dL} \sum_{l=1}^L g(u_l), \tag{8}$$

де  $u_1 = d^{-1}(v - v_1)$ ;  $g(u_1)$  – деяка вагова функція, яка зветься ядром;  $d$  – константа, яка зветься коефіцієнтом розмитості;  $v_1$  –  $l$ -та реалізація випадкової величини  $V$ . Відповідно до [4] доцільно ядро обирати у вигляді рівномірної щільності розподілу. Для обраного виду щільності розподілу ядра оптимальним буде обрання коефіцієнту розмитості із співвідношення [2]

$$d = 0,5 \sup |v_l - v_{l-1}|, \quad v_l \geq v_{l-1}, \quad l = \overline{2, L}. \quad (9)$$

З обранням коефіцієнта розмитості ядра  $d$  (9) та з урахуванням рівномірної щільності ядро набуває вигляду

$$g_l(v) = \begin{cases} 0 & v < v_1 - d \\ 0,5d^{-1}(v - (v_1 - d)) & v_1 - d \leq v \leq v_1 + d \\ 1 & v > v_1 + d \end{cases}, \quad (10)$$

тоді оцінка одномірної щільності розподілу випадкового коефіцієнту  $V$  виглядає

$$f_1(v) = \frac{1}{dL} \sum_{l=1}^L g_l(v). \quad (11)$$

Обчисливши оцінку (11)  $l$  разів відносно сукупності випадкових коефіцієнтів  $\{V\}$  отримуємо послідовність статистичних оцінок  $f_L(v_i)$  їх одномірних щільності розподілу.

Для зручності моделювання отримані оцінки апроксимуємо ступінчатою кривою, яка обмежує ряд прямокутників рівної площі [4]. При застосуванні такого методу представлення щільності розподілу достатньо знати абсциси крапок які відповідають стрибкам кривої, що апроксимує  $c_k$ . Ці абсциси знайдемо з рівняння [4]

$$\int_{c_k}^{c_{k+1}} f(v) dv = \frac{1}{m}, \quad k = 0, 1, \dots, m, \quad (12)$$

де  $m$  – кількість інтервалів дрібнення (задається у залежності від потрібної точності обчислення).

Першу абсцису стрибка кривої, що апроксимує  $c_0$  задаємо як [2]

$$c_0 = V_{\min} - d. \quad (13)$$

Усі інші значення  $c_k$  визначаються послідовним рішенням рівняння (12), де у кожному конкретному випадку залишається невідомою одна верхня межа інтегрування.

Як відомо,

$$\int_{c_k}^{c_{k+1}} f(v) dv = F(c_{k+1}) - F(c_k), \quad (14)$$

де  $F(v)$  – інтегральний закон розподілу випадкової величини  $V$ .

Тому для розв'язання рівняння (12) перейдемо від щільності розподілу (11) до інтегрального закону. Тоді отримаємо

$$F_L(v) = \frac{1}{dL} \sum_{l=1}^L g_l(v), \quad (15)$$

де  $g_l(v)$  обчислюється за формулою (10).

Сукупність формул (13) – (15) повністю визначає параметри побудови функції щільності розподілу випадкових коефіцієнтів  $V$  канонічного розкладу випадкового процесу  $X(t)$ .

Наявність математичного опису апіорного випадкового процесу дозволяє вирішити задачу прогнозування.

Математичне сподівання умовного апостеріорного процесу для будь-якого числа  $k$  моментів контролю набуває вигляду [4]

$$m^{(k)}(i) = m^{(k-1)}(i) - (x(k) - m^{(k-1)}(k))\phi_k(i), \quad (16)$$

де  $i = \overline{1, I}$ , а умовний апостеріорний процес

$$X^{(k)}(i) = m^{(k)}(i) + \sum_{v=k+1}^i V_v \phi_v(i), \quad i = \overline{1, I}. \quad (17)$$

Застосування виразів (16), (17) дозволяє вирішити задачу лінійного прогнозування технічного стану з найменшим середнім квадратом похибки [2].

Для отримання прогнозу надійності об'єкта що контролюється застосуємо метод Монте-Карло. За формулами (16) та (17) сформуємо  $N$  реалізацій умовного апостеріорного процесу.

Кожне обчислене значення  $X^{(k)}(i)$  (17) зрівняємо з межами допуску  $[a, b]$ . Якщо значення реалізації, яка була змодельована, вийшло за межі зони допуску фіксується відмова.

Після перевірки значень всіх  $N$  реалізацій прогнозовану надійність знайдемо за формулою обчислення надійності [6]

$$P^{(k)}(i) = \frac{N - q_i}{N}, \quad k+1 \leq i \leq I, \quad (18)$$

де  $q_i$  – лічильник кількості відмов.

Математичне сподівання і дисперсію прогнозу надійності здійснимо за результатами  $M$ -кратного моделювання та розрахуємо за стандартними формулами для математичного сподівання та дисперсії [1].

Алгоритм оцінки прогнозу надійності функціонування елементу РЕО АТ заснований на розглянутій методиці реалізований на електронній обчислювальній машині (ЕОМ) та складається з п'яти основних частин.

У першій частині здійснюється введення до ЕОМ вхідних даних: значення контрольованого параметру РЕО АТ (зручно представити у вигляді таб-

лиці розміром  $L \times I$ , де  $i = \overline{1, I}$  дискретні моменти часу  $t_i$  у які здійснювалось вимірювання,  $l = \overline{1, L}$  – кількість елементів РЕО АТ що підлягали контролю); верхню та нижню межу допуску контрольованого параметру відповідно значення величин  $a$  і  $b$ ; значення  $m$  – кількість інтервалів дрібнення оцінки щільності розподілу випадкових коефіцієнтів  $f_1(v)$  та  $M$  – кратність моделювання апостеріорного умовного процесу

У другій частині алгоритму знаходяться елементи канонічного розкладу процесу за рівняннями (3) – (6) та заносяться до відповідних таблиць  $V$  та  $\varphi$ .

У третій частині алгоритму здійснюються статистичні оцінки одномірних функцій щільності розподілу випадкових коефіцієнтів  $f_L(v_i)$ , За рівняннями (13) – (15) знаходяться координати дрібнення цього дрібнення і заносяться у відповідну таблицю.

У четвертій частині алгоритму здійснюється моделювання апостеріорного умовного процесу, за формулами (16), (17).

Прогноз надійності розраховується у п'ятій частині алгоритму. Для цього проводиться  $M$ -кратне виконання четвертої частини алгоритму. Отримані результати порівнюються з межами допуску і підраховується кількість відмов. За формулою (18), розраховується прогноз надійності та його значення виводяться на екран монітору або принтер для друку.

По результатах прогнозу надійності приймається рішення про подальшу експлуатацію елемента радіоелектронного обладнання авіаційної техніки який підлягав контролю.

## Висновки

Запропонована методика надає можливість практично оцінити надійність радіоелектронного

обладнання при експлуатації авіаційної техніки за станом з контролем параметрів та на підставі отриманих результатів приймати рішення щодо подальшої експлуатації.

Методика носить досить універсальний характер тому як при її складанні не висувались обмеження на вид та характер випадкового процесу що досліджувався.

При сучасному розвитку засобів обчислювальної техніки, програмного забезпечення, радіотехнічних приладів вимірювання реалізація запропонованої методики не представляє труднощів.

Методика не містить евристичних підходів і може бути застосована при прогнозуванні надійності технічного стану в інших галузях.

## Список літератури

1. Основи надійності авіаційної техніки / Г.Н. Котельніков. – К.: КІ ВПС, 1999. – 144 с.
2. Фильтрация, экстраполяция и распознавание случайных функций / В.Д. Кудрицкий. – К.: ФАДА, ЛТД, 2001. – 176 с.
3. Пугачев В.С. Теория случайных функций / В.С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1962. – 764
4. Бусленко Н.П. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах / Н.П. Бусленко Ю.А. Шрейдер. – М.: Государственное изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 226 с.
5. Соловйов В.І. Організація експлуатації авіаційної техніки / В.І. Соловйов. – К.: НАОУ, 2005. – 222 с.
6. Дмитриевский Е.С. Конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационной надежности авиационного радиоэлектронного оборудования: Учеб. пособие / Е.С. Дмитриевский. – СПб: ГУАП. СПб., 2001. – 88 с: ил.

Надійшла до редколегії 12.10.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», Київ.

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПО СОСТОЯНИЮ С КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРОВ

Н.В. Гудков

*В статье предложена методика оценки прогноза надежности радиоэлектронного оборудования при эксплуатации авиационной техники по состоянию с контролем параметров. Методика базируется на аппарате канонических разложений случайных величин. Прогнозирование осуществляется в три этапа. В первую очередь, производится каноническое разложение априорного исследуемого процесса. После статистической обработки полученных случайных коэффициентов канонического разложения осуществляется моделирование апостериорного процесса. По полученным реализациям апостериорного процесса по методу Монте-Карло рассчитывается прогноз надежности.*

**Ключевые слова:** прогнозирование надежности, радиоэлектронное оборудование, канонические разложения, случайные функции, эксплуатация по состоянию, авиационная техника.

## RELIABILITY PROGNOSTICATION METHODIC OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT DURING AVIONICS EXPLOITATION BY STATE WITH CONTROL OF PARAMETERS

N.V. Gudkov

*In the article offered methodic the estimation reliability prognosis of exploitation radio electronic equipment at during of avionics on the state with control of parameters. A methodic is based on the vehicle of canonical decompositions of casual sizes. The prognosis is carried out in three stages. Above all things, canonical decomposition of a priori is made probed process. After statistical treatment of the got casual coefficients of canonical decomposition the design of a posteriori process is carried out. On the got realization of posteriori process the prognosis of reliability settles accounts on the method of Monte Carlo.*

**Keywords:** prognostication of reliability, radio electronic equipment, canonical decompositions, casual functions exploitation by state, avionics.