

УДК 62-192(06)

С.В. Новіченко, В.П. Квіткін

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків*

## МОДЕЛЬ СТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ БАГАТОРЕЖИМНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

*В даній статті розроблено модель стаціонарного процесу функціонування багаторежимних радіоелектронних систем для проведення імітаційного моделювання з метою підтвердження розрахункових методів, що визначають значення інтенсивності відмов даних систем. Розроблено алгоритм реалізації стаціонарного випадкового процесу функціонування, на основі якого визначена оцінка середнього значення інтенсивності відмов багаторежимних радіоелектронних систем. Були використані методи теорії ймовірності, випадкових процесів і теорії математичної статистики.*

**Ключові слова:** моделювання, надійність, багаторежимні радіоелектронні системи.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У роботі [1] описаний метод розрахунку інтенсивності відмов багаторежимних радіоелектронних засобів, зразків озброєння й військової техніки, що враховує зміни значень коефіцієнтів електричного навантаження електрорадіовиробів (ЕРВ) при функціонуванні. Цінність отриманого методу полягає в більш високій точності розрахунку, що дозволяє робити більш раціональніший вибір варіанту схемно-конструктивного виконання багаторежимних радіоелектронних систем на стадії проектування та розробки зразків озброєння й військової техніки. Однак для використання даного методу при обґрунтуванні структури та параметрів радіоелектронних засобів, що розроблюються, доцільно підтвердити його достовірність.

**Аналіз літератури.** Для підтвердження достовірності теоретичних моделей, у тому числі і розрахунку показників безвідмовності, необхідно провести порівняння результатів, отриманих з їхньою допомогою, з результатами фізичного або математичного моделювання [2 – 4].

Висновки, зроблені при порівнянні результатів розрахунку використання аналітичних моделей з результатами фізичного моделювання, мають більший ступінь підтвердження достовірності аналітичних моделей, ніж висновки, зроблені при їх порівнянні з результатами проведення математичного моделювання. Однак, зважаючи на те, що проведення натурального експерименту вимагає великих часо-вих і грошових витрат, а також те, що методам математичного моделювання властива більша гнучкість до змін умов моделювання, пріоритетним напрямком підтвердження достовірності теоретичних моделей, приведених в [1], є порівняння їх результатів з результатами математичного моделювання.

**Мета статті.** Метою даної статті є розробка методики математичного моделювання, що полягає

в одержанні реалізацій процесу функціонування (ПФ)  $j t$  за спеціальними правилами за допомогою датчика випадкових чисел і в оцінюванні середнього значення інтенсивності відмов багаторежимної радіоелектронної системи на етапі нормальної експлуатації за допомогою статистичного аналога однієї з моделей методу [1], відповідно до виду процесу  $j t$ .

### Основний матеріал

В [1] було відзначено, що ПФ  $j t$  багаторежимних радіоелектронних систем може бути представлений у вигляді трьох основних варіантів: повністю детермінованим, дискретним випадковим процесом з безперервним часом і стаціонарним (у вузькому значенні) випадковим дискретним процесом з безперервним часом.

Випадковий процес характеризується тим, що будь-яка фізична величина змінюється в деякому просторі, причому ця зміна керується ймовірністними законами [5]. У цьому випадку фізичною величиною, що змінюється, є номер функціонуючої режимної множини елементів (ФРМЕ). Безумовно, дана величина змінюється в дискретному просторі, що вказує на дискретність простору стану ПФ  $j t \in \overline{1, m}$ .

У загальному випадку, тривалість функціонування багаторежимних радіоелектронних систем у будь-якому режимі є випадковою величиною, реалізація якої приймає значення з множини дійсних чисел, що вказує на безперервність ПФ за часом.

Завдяки цим міркуванням можна класифікувати даний процес як процес, що належить до дискретних випадкових процесів з безперервним часом.

Будь-який випадковий процес є сімейством випадкових величин [6]. Дискретний випадковий процес з безперервним часом зручно подати за допомо-

гою сімейства випадкових величин, які можна розділити на два види: дискретних випадкових величин і безперервних випадкових величин.

Дискретні випадкові величини, які використовуються для формування даного процесу, мають фізичну розмірність номера ФРМЕ, а безперервні випадкові величини мають фізичну розмірність тривалості функціонування багаторежимної радіоелектронної системи в поточному самому режимі.

З урахуванням наведених міркувань можна представити дискретний випадковий ПФ із безперервним часом як сімейство випадкових величин наступним чином:

$$j \ t = n_x, \ z_{x-1} \leq t < z_x, \\ z_0 = 0, \ z_x = \sum_{q=1}^x \tau_q, \quad (1)$$

де  $n_x \in \overline{1, m}$ ,  $x \in \{1, 2, \dots\}$  – сукупність дискретних випадкових величин;

$\tau_x \in 0, \infty$ ,  $x \in \{1, 2, \dots\}$  – сукупність безперервних випадкових величин.

Вираз (1) описує подання дискретного випадкового ПФ з безперервним часом. Одержання його реалізацій (детермінованих функцій часу) здійснюється шляхом одержання реалізацій випадкових величин, які його породжують, і їх відповідної підстановки у вираз (1). При цьому враховується певна тривалість процесу, що відповідає тривалості етапу нормальної експлуатації:

$$j_r \ t = n_x^r, \ z_{x-1}^r \leq t < z_x^r, \\ x = 1, 2, 3, \dots, N_r, \quad (2)$$

де  $z_0^r = 0$ ,  $z_x^r = \sum_{q=1}^x \tau_q^r$ ;

$n_x^r$  і  $\tau_x^r$  – реалізації відповідних випадкових величин  $n_x$  і  $\tau_x$  для  $r$ -ї реалізації випадкового процесу;

$N_r \in \{1, 2, \dots\}$  – визначається з умови

$$t_H \in \left[ \sum_{x=1}^{N_r-1} \tau_x^r, \sum_{x=1}^{N_r} \tau_x^r \right).$$

Випадкова величина  $n_x$  являє собою номер ФРМЕ системи в інтервалі часу:

$$z_{x-1}^r \leq t < z_x^r,$$

де  $x = 1, 2, 3, \dots, N_r$ ,

$$t_H \in [z_{N_r-1}^r, z_{N_r}^r].$$

Множина можливих значень випадкової величини  $n_x$  являє собою підмножину натуральних чисел, обмежену інтервалом  $1, m$ .

Випадкова величина  $\tau_x$  являє собою тривалість функціонування в  $n_x^r$ -му режимі, де

$$x = 1, 2, 3, \dots, N_r, \ t_H \in [z_{N_r-1}^r, z_{N_r}^r].$$

Множина можливих значень випадкової величини  $\tau_x$  теоретично являє собою підмножину дійсних позитивних чисел.

Залежно від ступеню й характеру впливу випадкових факторів на черговість зміни режимів і тривалість функціонування в них, величини  $n_x^r$  й  $\tau_x^r$  можна представити реалізаціями відповідних випадкових величин  $n_x$  й  $\tau_x$  або величинами, значення яких не залежать від проведення конкретного моделювання, і які визначаються відповідно до формалізації ПФ.

Перший випадок, коли величини  $n_x^r$  й  $\tau_x^r$  можна формалізувати чисельно за весь період нормальної експлуатації, де

$$x = 1, 2, 3, \dots, N_r, \ t_H \in [z_{N_r-1}^r, z_{N_r}^r],$$

ПФ  $j \ t$  являє собою функцію часу.

У загальному випадку функцію  $j \ t$  можна представити в наступному вигляді:

$$j \ t = \begin{cases} 1, & \text{для } t \in T_1, \\ 2, & \text{для } t \in T_2, \\ \vdots & \\ m, & \text{для } t \in T_m, \end{cases}$$

де  $T_j$  – формалізована множина інтервалів часу функціонування багаторежимної радіоелектронної системи в  $j$ -му режимі за весь етап нормальної експлуатації.

Цей вираз описує детермінований ПФ багаторежимних радіоелектронних засобів, при якому застосовується відповідне усереднення [1].

Для одержання реалізацій  $n_x^r$  і  $\tau_x^r$  випадкових величин  $n_x$  і  $\tau_x$ , виникає завдання формалізації їх законів розподілу й характеру їх залежності.

Правило формування реалізації випадкового ПФ  $j \ t$  представлено виразом (2), у якому  $n_x$  й  $\tau_x$  – випадкові величини з довільними законами розподілу.

Вираз (2), з використанням випадкових величин  $n_x$  і  $\tau_x$ , що мають довільні закони розподілу, описує реалізацію ПФ багаторежимних радіоелектронних систем, представленого у вигляді дискретного випадкового процесу з безперервним часом.

При моделюванні випадкового ПФ необхідно надати йому певні значення необхідних параметрів:

$\xi_j^{TP}$  – ймовірності того, що випадковий процес  $j \ t$

у довільний момент часу приймає значення  $j$  у випадку, коли ПФ є стаціонарним ПФ (СПФ).

Вираз для розрахунку параметрів  $\xi_j^{TP}$  СПФ, згідно [3], має вигляд:

$$\xi_j^{TP} = \frac{P_{n=j} \cdot m_{\tau|n^r=j}}{\sum_{q=1}^m \left( P_{n=q} \cdot m_{\tau|n^r=q} \right)}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

де  $P_{n=j}$  – ряд розподілу випадкової величини  $n$ ;

$m$  – кількість режимів функціонування системи;

$m_{\tau|n^r=j}$  – умовне математичне сподівання випадкової величини  $\tau$  за умови, що випадкова величина  $n$  приймає значення  $j$ .

З виразу (3) видно, що за вимагаємими значеннями  $\xi_j^{TP}$ ,  $j = \overline{1, m}$  параметрів СПФ багаторежимної радіоелектронної системи необхідно визначити ряд розподілу  $P_{n=j}$ ,  $j = \overline{1, m}$  й умовні математичні сподівання  $m_{\tau|n^r=j}$ ,  $j = \overline{1, m}$ .

З аналізу виразу (3) випливає невизначеність у визначенні значень параметрів законів розподілу випадкових величин, тому що відомий параметр один  $\xi_j^{TP}$ , а невідомих два:  $P_{n=j}$  і  $m_{\tau|n^r=j}$ .

Невизначеність складається в невідомості розподілу значень між невідомими параметрами (змінними)  $P_{n=j}$  і  $m_{\tau|n^r=j}$  для того, щоб одержати необхідне значення  $\xi_j^{TP}$  за правилом (3).

У межах даного дослідження вид такого розподілу можна задати довільно (найбільш зручно), тому що основним завданням є надання процесу, що моделюється, необхідних параметрів  $\xi_j^{TP}$ .

Враховуючи ці міркування можна запропонувати ввести допущення про рівномірність ряду розподілу випадкової величини  $n$ :

$$j \Leftrightarrow P_{n=j} = \frac{1}{m}. \quad (4)$$

У цьому випадку, для визначення умовного математичного сподівання випадкової величини  $\tau$  маємо систему:

$$\begin{cases} m_{\tau|n^r=j} \\ \sum_{q=1}^m m_{\tau|n^r=q} \end{cases} = \xi_j^{TP}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Відносно параметрів  $m_{\tau|n^r=j}$ ,  $j = \overline{1, m}$  система (5) рішення не має, однак, його можна отримати, якщо буде відомий хоча б один з параметрів  $m_{\tau|n^r=j}$ .

Вирішити це завдання можна за допомогою використання значення середнього часу функціонування  $m_{\tau} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m m_{\tau|n^r=j}$  багаторежимної радіоелектронної системи в довільному режимі. Значення параметра  $m_{\tau}$  задається методами експертної оцінки при прогнозуванні характеру функціонування конкретної багаторежимної радіоелектронної системи.

З використанням значення параметра  $m_{\tau}$ , у систему (5) можна дописати ще одне рівняння:

$$\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m m_{\tau|n^r=j} = m_{\tau}.$$

З урахуванням цього рівняння система (5) щодо параметрів  $m_{\tau|n^r=j}$ ,  $j = \overline{1, m}$  має рішення, яке після перетворень має вигляд:

$$\begin{cases} m_{\tau|n^r=j} \\ \end{cases} = \xi_j^{TP} \cdot m \cdot m_{\tau}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Таким чином, враховуючи те, що випадкова величина  $n$  має розподіл (4), випадкова величина  $\tau$  повинна мати певні значення умовного математичного очікування, які визначаються за допомогою виразу (6).

Для одержання реалізацій випадкових величин недостатньо знання значень їх числових характеристик. Необхідне знання самого закону розподілу [6]. У цьому випадку необхідно знати умовний закон розподілу

$$F_{\tau|n^r=j}(y, j, t), \quad y, j, t, \quad y \in 0, \infty, \quad j = \overline{1, m}, \quad t \in 0, t_n$$

випадкової величини  $\tau$ .

Для досягнення поставленої мети (підтвердження вірогідності методу [1]) вид умовного закону розподілу можна приймати довільно. Це обумовлено тим, що на результат, отриманий за допомогою аналітичних моделей методу [1], впливають лише значення параметрів ПФ  $\xi_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , які можна задавати за допомогою варіювання значенням умовної числової характеристики (6).

При моделюванні подібних процесів час перебування в певному стані вважають розподіленим за експоненціальним законом [6]. У зв'язку з цим є необхідність у використанні експоненціальної моделі

розподілу випадкової величини  $\tau$ , умовний закон розподілу якої представити у вигляді [7]:

$$F_{\tau|n^r=j} x, j = 1 - e^{-\eta_j x}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

де  $\eta_j$  –  $j$ -й параметр умовного закону розподілу.

При експоненціальному умовному законі розподілу (7) випадкова величина  $\tau$  має умовне математичне сподівання [7]:

$$m_{\tau|n^r=j} = \frac{1}{\eta_j}. \quad (8)$$

Поєднуючи (8) і (6), можна визначити параметри умовного закону розподілу  $\eta_j, j = \overline{1, m}$  таким чином:

$$\eta_j = \frac{1}{\xi_j^{TP} \cdot m \cdot m_\tau}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (9)$$

Для отримання реалізацій випадкових величин необхідно мати датчик випадкових чисел [6] – пристрій, що видає незалежні реалізації  $\omega_1, \omega_2, \dots$  випадкової величини  $\omega$  (найчастіше в цифровому коді) за заданим законом розподілу (звичайно за рівномірним, в інтервалі  $[0, 1]$ ).

Реалізація дискретної випадкової величини  $n$  з рядом розподілу (4) може бути отримана за допомогою використання датчика випадкових чисел [6], що видає незалежні реалізації  $\omega_1, \omega_2, \dots$  випадкової величини  $\omega$ , розподіленої за рівномірним законом, в інтервалі  $[0, 1]$ , за алгоритмом:

$$\text{якщо } \omega_x \in \left[ \frac{j-1}{m}, \frac{j}{m} \right), \text{ то } n_x^r = j, \quad (10)$$

де  $j = \overline{1, m}$ , а  $x = \overline{1, N_r}$ .

При використанні експоненціальної моделі розподілу випадкової величини  $\tau$ , правило отримання її реалізації можна записати:

$$\tau_x^r = - \xi_{n_x^r}^{TP} \cdot m \cdot m_\tau \cdot \ln(1 - \omega_x), \quad x = \overline{1, N_r}. \quad (11)$$

Якщо випадковий процес  $j_r t$  заданий, і  $f_{j_r t}$  – функціонал від нього у вигляді статистичного аналога стаціонарної моделі методу [1], то для одержання оцінки необхідно по незалежних реалізаціях випадкового процесу  $j_r t$  оцінити [6]:

$$\overline{\lambda_M^C} = \frac{1}{W} \sum_{r=1}^W f_{j_r t}, \quad (12)$$

де  $\overline{\lambda_M^C}$  – оцінка середнього значення інтенсивності відмов багаторежимної радіоелектронної системи за етап нормальної експлуатації;

$W$  – кількість реалізацій випадкового процесу  $j_r t$  із заданими параметрами.

Номер функціонуючої режимної множини елементів визначає значення інтенсивності відмов системи, тобто існує функціональний зв'язок між реалізацією ПФ  $j_r t$  і значенням інтенсивності відмов багаторежимної радіоелектронної системи  $\lambda^C_{j_r t}$ .

З огляду на стаціонарну модель методу [1] й (2) легко показати, що середнє значення інтенсивності відмов багаторежимних радіоелектронних систем на етапі нормальної експлуатації по реалізації  $j_r t$  СПФ  $j_r t$ , має вигляд:

$$f_{j_r t} = \frac{1}{\sum_{y=1}^{N_r} \tau_y^r} \sum_{x=1}^{N_r} \left( \lambda_{n_x^r}^C \cdot \tau_x^r \right), \quad (13)$$

де  $n_x^r$  й  $\tau_x^r$  – реалізації відповідних випадкових величин  $n_x$  і  $\tau_x$  для  $r$ -ї реалізації випадкового процесу  $j_r t$ .

Використовуючи (12) і (13), можна представити вираз для опису алгоритму статистичного моделювання СПФ за етап нормальної експлуатації з оцінкою середнього значення інтенсивності відмов багаторежимної радіоелектронної системи у вигляді:

$$\overline{\lambda_M^C} = \frac{1}{W} \sum_{r=1}^W \left( \frac{1}{\sum_{x=1}^{N_r} \tau_x^r} \sum_{x=1}^{N_r} \left( \lambda_{n_x^r}^C \cdot \tau_x^r \right) \right), \quad (14)$$

де  $n_x^r, x = \overline{1, N_r}$  визначаються за допомогою (10);

$\tau_x^r, x = \overline{1, N_r}$  визначаються за допомогою (11);

$N_r \in \{1, 2, \dots\}$  – визначається з умови

$$t_H \in \left[ \sum_{x=1}^{N_r-1} \tau_x^r, \sum_{x=1}^{N_r} \tau_x^r \right).$$

## Висновки

Таким чином, у даній статті розроблена методика статистичного моделювання стаціонарного процесу функціонування багаторежимних радіоелектронних систем, що дозволяє на конкретному прикладі перевірити якість розрахунку за методом [1], що враховує особливості функціонування даних систем.

Отримано алгоритм реалізації стаціонарного випадкового процесу функціонування й оцінка се-

реднього значення інтенсивності відмов багаторежимних радіоелектронних засобів, на основі чого планується проведення моделювання з метою підтвердження достовірності розрахункового методу описаного в [1].

### Список літератури

1. Стулов Л.В. Метод расчета интенсивности отказов многорежимных радиоэлектронных средств, образцов вооружения и военной техники, учитывающей стратегию использования режимов функционирования / Л.В. Стулов, С.В. Новиченко // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вип. 2 (2). – С. 66-68.
2. Сахаров М.А. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления РЭС и БВС: Учебное пособие / М.А. Сахаров. – М.: Изд-во МАИ, 1992. – 52 с.
3. Лега Ю.Г. Моделирование процессов в технических системах: моногр. / Ю.Г. Лега, А.А. Сытник, В.Ф. Юзвенко, О.В. Подгорный. – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 183 с.
4. Нестеренко Б.Б. Моделирование паралельных процесів: від мереж Петрі до нейронних мереж: моногр. / Б.Б. Нестеренко, М.А. Новотарський. – К., 2004. – 66 с.

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника: моногр. / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

6. Надежность и эффективность в технике / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др.: справ. в 10 т. – Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности / Под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

7. Беляев Ю.К. Надежность технических систем: справ. / Ю.К. Беляев; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

Надійшла до редколегії 14.08.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співр. В.В. Баранник, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МОДЕЛЬ СТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОРЕЖИМНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

С.В. Новиченко, В.П. Квиткин

В данной статье разработана модель стационарного процесса функционирования многорежимных радиоэлектронных систем для проведения имитационного моделирования с целью подтверждения достоверности расчетных методов, которые определяют значение интенсивности отказов данных систем. Разработан алгоритм реализации стационарного случайного процесса функционирования, на основе которого определена оценка среднего значения интенсивности отказов многорежимных радиоэлектронных систем. Были использованы методы теории вероятности, случайных процессов и теории математической статистики.

**Ключевые слова:** моделирование, надежность, многорежимные радиоэлектронные системы.

### MODEL OF FUNCTIONING STATIONARY PROCESS OF THE MULTIMODE RADIO ELECTRONIC SYSTEMS

S.V. Novichenko, V.P. Kvitkin

In this article the model of stationary process of functioning of the multimode radio electronic systems is developed for conducting of imitation design with the purpose of authenticity confirmation of calculation methods, determining the values of failure intensity of these systems. The algorithm of stationary casual process realization of functioning which the estimation of mean value of failure intensity of the multimode radio electronic systems is certain on the basis of is developed. The methods of probability theory, casual processes and theory of mathematical statistics were utilized.

**Keywords:** simulation, reliability, multimode radio electronic systems.