

*А.А. АНДРУСЕВИЧ, д-р техн. наук, Н.Г. СТАРОДУБЦЕВ, канд. техн. наук,  
В.В. НЕВЛЮДОВА*

## **ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

### **Введение**

Задачи обеспечения безотказности РЭС решаются на всех стадиях их жизненного цикла, однако особая роль в этом процессе отводится мероприятиям, проводимым на стадии проектирования. Именно на этой стадии жизненного цикла радиоэлектронных средств обеспечиваются требования к безотказности.

Известные методы расчета безотказности РЭС не в полной мере рассматривают влияние на безотказность изменения значений коэффициентов электрической нагрузки электрорадиоизделий (ЭРИ) вследствие изменения режимов функционирования радиоэлектронных систем во времени, что обуславливает возникновение методических погрешностей в расчетах.

Данный недостаток обусловлен, прежде всего, неадекватностью существующих методов расчета безотказности РЭС реальным процессам и явлениям из-за отсутствия формализации процесса функционирования радиоэлектронных систем как фактора, влияющего на коррекцию уровня безотказности элементов и системы в целом.

Поэтому необходимо усовершенствовать методы расчета и обеспечения безотказности РЭС, путем учета изменения значений коэффициентов электрических нагрузок ЭРИ в процессе функционирования.

### **Особенности РЭС, проявляющихся в процессе изменения режимов функционирования**

Возможность функционирования радиоэлектронной системы в различных режимах даёт основание определить понятие режимного множества элементов (РМЭ)  $R_j \in U$  как множества РЕ  $M_i$ , необходимых для функционирования системы в  $j$ -м режиме

$$R_j = \{M_i\}, \quad i \in I_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $I_j$  – множество номеров  $i$ -х РЕ, составляющих  $j$ -е РМЭ;  $m$  – общее количество режимов функционирования радиоэлектронной системы.

Для решения поставленных перед радиоэлектронной системой задач одновременно функционируют только определенные элементы, составляющие РМЭ. Это РМЭ составляет функционирующее режимное множество (ФРМЭ), т.е. РМЭ, которое необходимо для функционирования системы в определенном режиме в рассматриваемый момент времени.

Как правило, наибольшее значение нагрузочного параметра ЭРИ имеет в момент времени, когда оно принадлежит ФРМЭ.

РМЭ  $R_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , как подмножества системы не являются ее компонентами, потому что

$$\bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j>i}^m (R_i \cap R_j) = \Psi, \quad (2)$$

где  $\Psi$  – не пустое множество, представляющее РЕ, которые в результате пересечений имели место.

РЕ, которая принадлежит двум и более РМЭ и, следовательно, необходима для функционирования системы  $U$  в нескольких режимах, составляет ядерное подмножество элементов.

Каждой РЕ  $M_i$  ставится в соответствие структурное множество  $J_i$ :

$$M_i \Leftrightarrow J_i,$$

где  $J_i$  – множество номеров всех режимов, для функционирования которых необходима совокупность ЭРИ, составляющая РЕ  $M_i$ .

Следовательно, для простых РЕ и ядерных подмножеств элементов будет существовать различие, состоящее в наличии одного или нескольких номеров ЭРИ множества  $J_i$  соответственно.

Особенностью совокупности ЭРИ, составляющей РЕ, является синхронное изменение значений их нагрузочных параметров при изменении режима функционирования системы, что обуславливает целесообразность рассмотрения задачи расчета интенсивности отказов системы по значениям интенсивности отказов этих совокупностей.

### Метод расчета интенсивности отказов РЭС, с учетом изменения значений коэффициентов электрической нагрузки

Безотказность совокупности ЭРИ, составляющей РЕ  $M_i$ , характеризуется интенсивностью отказов  $\lambda_i(t)$ .

Если рассмотреть, представленную в виде совокупности РЕ, радиоэлектронную систему с помощью метода структурных схем [1 – 3], то графическая модель безотказности системы будет иметь вид последовательного соединения совокупностей ЭРИ, составляющих РЕ (рис. 1).

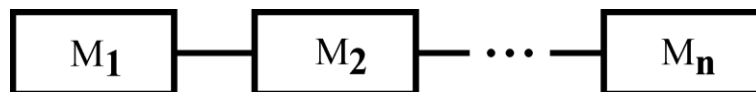


Рис. 1

Вид последовательного соединения РЕ в графической модели безотказности радиоэлектронной системы обуславливается тем, что отказ каких-либо РЕ, например  $M_1$ , неизбежно повлечет за собой отказ системы, поскольку она потеряет способность функционировать в  $j \in J_1$  режимах и, следовательно, потеряет способность выполнять хотя бы одну возложенную на нее функцию. При этом выражение для расчета интенсивности отказов системы в предположении независимости отказов совокупностей ЭРИ, составляющих РЕ, имеет вид

$$\lambda^C(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t),$$

где  $\lambda_i(t)$  – интенсивность отказов совокупности ЭРИ, что составляет  $i$ -ю РЕ, которая рассчитывается исходя из их конкретных схмотехнических конструкций. Для избыточной структуры РЕ выражение, по которому определяется значение ее интенсивности отказов, имеет вид [4]

$$\lambda_i(t) = \sum_{k=1}^{L_i} \lambda_k^i(t),$$

где  $\lambda_k^i(t)$  – значение интенсивности отказов  $k$ -го ЭРИ из-за  $i$ -го РЕ;  $L_i$  – количество существенных ЭРИ в  $i$ -м РЕ.

На данном этапе исследования было принято предположение о том, что при неизменности условий эксплуатации и режимов (температурного и электрического), значение эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ не меняется во времени, т.е.  $\lambda_k^i(t) = \lambda_{\ominus}$ , где  $\lambda_{\ominus}$  – оценка эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ [3, 5]. Данное упрощение не строго справедливо из-за действия различных факторов (старение, износ, диффузия материалов и т.д.), однако для элементов радиоэлектронной аппаратуры вполне оправдано из-за наличия достаточно полного справочного (статистического) материала, обрабатываемого экспоненциальными моделями.

Используя обобщенные аналитические модели для расчета эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ, с учетом изменения значений коэффициентов их электрической нагрузки, была установлена функциональная связь между номером ФРМЭ  $j^{\phi}$  и значением эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ

$$\lambda_{\ominus}(j^{\phi}) = \lambda_{\sigma}^* K_p(j^{\phi}) \prod_{v=1}^b K_v, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\sigma}^*$  – значение начальной, базовой интенсивности отказов типа ЭРИ, приведенное к номинальным условиям;  $K_p$  – коэффициент режима, учитывающий изменение значения начальной, базовой интенсивности отказов ЭРИ, в зависимости от электрической нагрузки и (или) температуры окружающей среды;  $K_v$  – коэффициенты, учитывающие изменение значения начальной, базовой интенсивности отказов ЭРИ, вследствие воздействия различных факторов;  $b$  – количество учитываемых факторов.

Применяя обобщенную схему расчета показателей безотказности радиоэлектронных систем по известным значениям показателей безотказности их составных частей и модель расчета эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ (3), была установлена функциональная связь между номером ФРМЭ и значением интенсивности отказов радиоэлектронной системы (для не избыточной структуры)

$$\lambda^C(j^{\phi}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{L_i} \left[ \lambda_{\sigma}^* K_p(j^{\phi}) \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i, \quad (4)$$

где выражение в квадратных скобках определяется для  $k$ -го ЭРИ  $i$ -го РЕ.

Значение коэффициента режима ЭРИ зависит от значений двух величин: коэффициента электрической нагрузки и температуры окружающей среды, однако изменение номера ФРМЭ приводит к существенному изменению только значение коэффициента электрической нагрузки [6]. В связи с этим была установлена функциональная связь

$$\left[ K_p(j^{\phi}) \right]_k^i = \psi_k^i(K_{эл}(j^{\phi})), \quad (5)$$

где  $K_{эл}(j^{\phi})$  – зависимость коэффициента электрической нагрузки ЭРИ от номера ФРМЭ;  $\psi_k^i(\bullet)$  – функция коэффициента режима  $k$ -го ЭРИ  $i$ -го РЕ.

Было определено, что во время функционирования радиоэлектронной системы номер ФРМЭ меняется, что приводит к изменению значения интенсивности отказов системы (рис. 2), более того, это изменение может носить случайный характер.

Как правило, изменения режимов функционирования радиоэлектронных систем происходят довольно часто, по сравнению с возникновением их отказов. Поэтому возникла необходимость в определении среднего значения интенсивности отказов системы за определенный интервал времени.

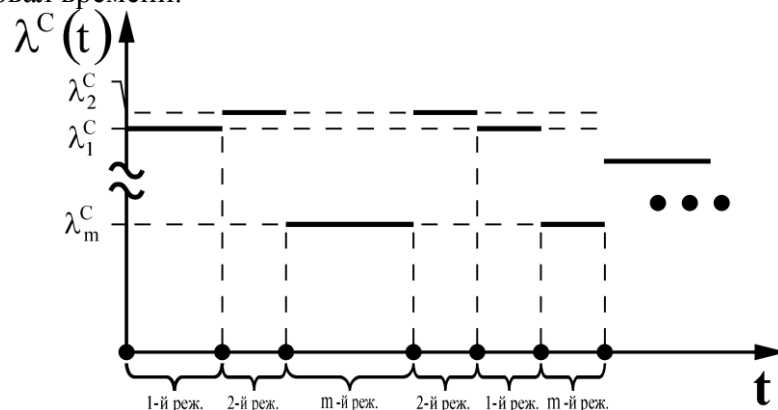


Рис. 2

В качестве интервала времени усреднения был принят суммарный интервал времени функционирования радиоэлектронной системы на этапе нормальной эксплуатации. В результате анализа процесса функционирования (ПФ) (процесса переключения режимов функционирования) радиоэлектронных систем, были определены три основных его типа:

- полностью детерминированный процесс функционирования;
- стационарный, в узком смысле, дискретный случайный процесс с непрерывным временем (СПФ);
- нестационарный дискретный случайный процесс с непрерывным временем (НПФ).

В зависимости от типа ПФ радиоэлектронных систем, в данной работе были разработаны соответствующие аналитические модели расчета среднего значения их интенсивности отказов, которые составляют основу разработанного метода расчета интенсивности отказов РЭС, учитывающий изменение значений коэффициентов электрической нагрузки ЭРИ при функционировании

$$\lambda_M^C = \frac{1}{t_H} \sum_{i=1}^n \int_0^{t_H} \left[ \sum_{k=1}^{L_i} \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}(j)) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i \right] dt, \quad (6)$$

$$\lambda_M^C(t) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \left( \sum_{k=1}^{L_i} \left( \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}(j)) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i \right) \cdot \xi_j(t) \right) \right), \quad (7)$$

$$\lambda_M^C = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \left( \sum_{k=1}^{L_i} \left( \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}(j)) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i \right) \cdot \xi_j \right) \right), \quad (8)$$

где  $t_H$  – продолжительность функционирования системы за период нормальной эксплуатации;  $\xi_j(t)$  – значение вероятности использования радиоэлектронной системы в  $j$ -м режиме функционирования в момент времени  $t$ ;  $\xi_j$  – значение вероятности использования

радиоэлектронной системы в  $j$ -м режиме в произвольный момент времени функционирования.

Вероятности  $\xi_j(t)$ ,  $\xi_j$  еще называются параметрами процесса функционирования нестационарного и стационарного (в узком смысле) соответственно.

В дальнейшем была проведена сравнительная оценка точности, разработанного в работе метода в сравнении с методом структурных схем, в результате чего были определены выражения для СПФ и НПФ соответственно

$$\Delta\lambda^C = \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \xi_j \cdot \sum_{k=1}^{L_i} \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}(j)) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i - \sum_{k=1}^{L_i} \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}^*) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i \right) \right|, \quad (9)$$

$$\Delta\lambda^C(t) = \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \xi_j(t) \cdot \sum_{k=1}^{L_i} \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}(j)) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i - \sum_{k=1}^{L_i} \left[ \lambda_{\sigma}^* \cdot \psi_k^i(K_{эл}^*) \cdot \prod_{v=1}^b K_v \right]_k^i \right) \right|, \quad (10)$$

Анализируя выражения (9) и (10) можно сделать вывод, что сравнительная точность, разработанного метода расчета интенсивности отказов РЭС АРЭК, учитывающего изменения значений коэффициентов электрических нагрузок ЭРИ при функционировании, по сравнению с ранее известным методом, не учитываемым подобного изменения, зависит от многих параметров и характеристик.

Однако можно констатировать наиболее чувствительные, к изменению сравнительной оценки точности, параметры, такие как:

- распределение значений параметров ПФ  $\xi_j(t)$ ,  $j = \overline{1, m}$  или  $\xi_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;
- значения коэффициентов электрической нагрузки ЭРИ, при различных режимах функционирования радиоэлектронной системы  $[K_{эл}(j)]_k^i$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;
- значения коэффициентов электрической нагрузки ЭРИ  $K_{эл}^*$ .

## Выводы

1. Из анализа математической модели радиоэлектронных систем следует, что режимы нагрузки ЭРИ изменяются при функционировании. Изменения режимов нагрузки ЭРИ возникают вследствие изменения режимов функционирования РЭС.

2. Используя обобщенные аналитические модели для расчета эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ [7], с учетом изменения значений коэффициентов их электрической нагрузки, была установлена функциональная связь между номером ФРМЭ и значением эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ (3).

3. Сравнительная оценка точности расчета интенсивности отказов радиоэлектронных систем предлагаемым методом по сравнению с методом структурных схем, зависит от значений параметров ПФ, от значений коэффициентов электрических нагрузок ЭРИ, при функционировании системы в различных режимах, а также от того, каким образом осуществлялось усреднение значений коэффициентов электрических нагрузок ЭРИ, для предоставления исходных данных при расчете с помощью метода-прототипа.

**Список литературы:** 1. *Надежность технических систем* : монография / Е. Переверзев, А. Алпанов, Ю. Даниев, П. Новак. – Д. : Пороги, 2002. – 396с. 2. *Ланецкий Б.Н.* Основы теории надежности, эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры зенитных ракетных систем : справ. материалы. – Харьков : ХВУ, 1998. – 400с. 3. *Чернышев А.А.* Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем : монография. – М. : Радио и связь, 1988. – 256с. 4. *Гнеденко Б.В.* Вопросы математической теории надежности : монография. – М. : Радио и связь, 1983. – 376с. 5. *MIL-STD-756B.* Reliability Prediction. – Washington D.C.: Department of Defense,

1981. – 96р. 6. Хотунцев Ю.Л., Лобарев А.С. Основы радиоэлектроники : учеб. пособие. – М. : Агар, 2000. – 288с. 7. Надежность ЭРИ : справочник / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, А.А. Борисов и др. ; науч. рук. С.Ф. Прытков. – М. : ЦНИИИ МО РФ, 2002. – 574с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.09.2014*