

*А. К. Гришко*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ОТКАЗОВ И ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ<sup>1</sup>

*A. K. Grishko*

## CALCULATION INDICATORS OF RELIABILITY STRUCTURAL ELEMENTS OF COMPLEX SYSTEMS WITH FAULT LOGGING AND PARAMETER CHANGES

**А н н о т а ц и я.** *Актуальность и цели.* Конструкции радиоэлектронных средств различного назначения классифицируются как сложные системы и характеризуются многоуровневой иерархической структурой в виде отдельных узлов, блоков, модулей. Поскольку в процессе эксплуатации на систему воздействует комплекс факторов, надежность функционирования сложной системы зависит и от показателей надежности элементов системы, и оптимального распределения значений показателей надежности между элементами системы. Целью данной статьи является определение требований надежности структурных элементов с учетом интенсивности отказов, а также возможных постепенных изменений параметров элементов проектируемой системы в процессе эксплуатации. В качестве накладываемых ограничений выступает требование обеспечения минимума затрат для заданного уровня надежности системы. *Материалы и методы.* Используются методы системного анализа, теории надежности сложных систем и теории вероятности, учитывающие интенсивность отказов и процессы изменения параметров в процессе эксплуатации. *Результаты.* В результате такого подхода появляется возможность дополнить известные методы и получить аналитические выражения для решения конструкторских задач обеспечения надежности с учетом возможных постепенных и внезапных отказов, а также возможных постепенных изменений параметров элементов проектируемой системы. *Выводы.* Разработанную методику определения требований к надежности элементов сложных технических систем предлагается применять на ранних этапах проектирования, когда отсутствие необходимой информации делает невозможным нахождение оптимального распределения норм надежности структурных элементов, обеспечивающее минимальную общую стоимость изделия. Помимо этого, методика определения надежности структурных элементов может применяться для проектирования высоконадежных систем бортовой радиоаппаратуры длительного функционирования.

**A b s t r a c t.** *Background.* Design of radio-electronic means for various purposes are classified as complex systems and are characterized by a multilevel hierarchical structure in the form of separate units, blocks, modules. Because in the process of operation of the system is influenced by complex factors, reliability of complex systems depends on the reliability of the elements of the system and optimal distribution of values of indicators of reliability between ele-

<sup>1</sup> Статья подготовлена в рамках проектной части государственного задания выполнения государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок) «№8.389.2014/К» по теме «Информационные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

ments of the system. The purpose of this article is to define the requirements of reliability of structural elements, with the possible gradual and catastrophic failure, and possible gradual changes of parameters of elements of the designed system. As the constraints is required to ensure the minimum cost for a given level of system reliability. *Materials and methods.* The article uses methods of system analysis, reliability theory of complex systems and probability theory, taking into account the occurrence of failures and the processes of change parameters in the process of operation. *Results.* As a result of this approach there is an opportunity to complement known methods and to obtain analytical expressions for solving design problems of reliability with regard to possible gradual and sudden failures, and possible gradual changes of parameters of elements of the designed system. *Conclusions.* Developed a methodology for defining the requirements for reliability elements of complex technical systems is proposed to apply at early design stages, when the lack of information makes impossible to find the optimal distribution of norms of reliability of structural elements that provides the minimum total cost of the product. In addition, the method of determining the reliability of structural elements can be used to design highly reliable board radio systems for long functioning.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** надежность, элемент, система, параметры, внезапные отказы, постепенные отказы.

**К e y w o r d s:** reliability, element, system parameters, unexpected failures, gradual failures.

### Введение и постановка задачи

Расчет надежности сложных технических изделий обычно начинают с его разложения на отдельные части, в отношении которых можно определить количественные характеристики надежности. Эта декомпозиция выполняется так, чтобы отдельные части можно было представить конструктивно в виде самостоятельных узлов, блоков или устройств, независимых в отношении отказов [1, 2]. Если у отказов соседних блоков существует зависимость друг от друга, их объединяют в один блок. Соответственно структурную часть изделия, для которого производят нахождение количественной характеристики надежности, называют элементом расчета надежности.

В процессе конструирования сложных технических изделий ответственного назначения особо важным является обеспечение определенного уровня его надежности [3, 4]. Как правило, необходимо, чтобы вероятность безотказной работы за определенный период времени не превышала требуемую величину. Но вследствие того, что расчет надежности сложных изделий производится в соответствии с его структурой, возникает задача по определению требований надежности для каждого из  $n$  элементов системы исходя из требований к проектируемому изделию в целом. При отсутствии дополнительных ограничений, например на массу, объем, габариты, стоимость, материальные затраты, решение задачи приходится искать в условиях неопределенности [5–7], так как любые увеличения показателя надежности структурного элемента будут приводить к повышению надежности всего изделия в целом. Если количество элементов в системе больше двух, то, следовательно, будет существовать множество вариантов для определения норм надежности для каждого элемента.

Допустим, задано требование по надежности некоторой системы в целом:

$$R \geq R_0, \quad (1)$$

где  $R$  – показатель надежности (вероятность безотказной работы);  $R_0$  – заданное значение показателя надежности системы в целом,  $0 < R_0 < 1$ . Обозначив через  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , показатель надежности  $i$ -го независимого элемента расчета надежности системы ( $i$ -й подсистемы), получаем:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i.$$

Таким образом, требуется найти значения  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , при выполнении условия (1).

### Определение надежности с учетом внезапных отказов

Выбор способа определения требований к надежности элементов системы существенно зависит от объема априорной информации [6, 8, 9]. Если допустить, что все элементы изделия близки по сложности и расчет надежности можно производить с учетом только внезапных отказов (считая, что интенсивность отказов изделия не имеет временной зависимости), используют метод равномерного распределения [5, 10], при этом

$$R_i = R^{1/n}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где  $n$  – число независимых элементов системы (подсистемы).

Если известны интенсивности отказов  $\lambda_j$  элементов (прототипов элементов)  $i$ -го типа, входящих в подсистему, и можно полагать, что интенсивности отказов не зависят от времени, и не учитывать постепенные изменения параметров, то  $R_i$  находят методом пропорционального распределения, например, по формуле

$$R_i = R^{\alpha_i}, \quad (3)$$

где

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j b_{ij} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda_j b_{ij} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$b_{ij}$  – число элементов  $i$ -й подсистемы, которые имеют интенсивность отказов  $\lambda_j$ .

Если задана структура системы и известны некоторые функции  $C_i(R_i)$ , где  $C_i(R_i)$  – ресурс, который затрачивается на обеспечение требований надежности  $i$ -й подсистемы, тогда задачу можно решить методом оптимального распределения [5, 7, 11]. В этом случае необходимо найти такие значения  $R_i$ , которые обеспечивают

$$\min \{C[C_i(R_i)], i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

при соблюдении условия (1). Здесь  $C[*]$  – некий функционал.

В общем случае эта задача на условную оптимизацию решается обычными способами дискретного программирования. Существуют различные варианты формулировки задачи (5). Например [12, 13], требуется найти:

$$\min_{l_i} \sum_{i=1}^n C_i(R_i), \quad i = \overline{1, n},$$

при условии, что

$$\prod_{i=1}^n R_{l_i} \geq R_0, \quad l_i = \overline{1, r_1}; \dots; l_i = \overline{1, r_n},$$

где  $C_i(R_{l_i})$  – значение стоимости  $i$ -го элемента изделия в  $l_i$ -м варианте исполнения;  $R_{l_i}$  – значение вероятности безотказной работы  $i$ -го элемента в  $l_i$ -м варианте исполнения;  $R_0$  – значение заданного уровня вероятности безотказной работы изделия, который распределяется между его структурными элементами. Для сформулированной в такой постановке задачи в работах [14–16], предложен способ ее решения, который оказывается эффективным на тех этапах проектирования, когда имеется информация о соотношении показателей надежности и значений стоимости для каждого возможного варианта исполнения элементов. Но поскольку на ранних стадиях проектирования эта информация, как правило, отсутствует или известна только частично, то найти оптимальное решение не удается. Иногда полагают, что

$$C[C_i(R_i)] = \sum_{i=1}^n g_i R_i (1 - R_i)^{-1} \quad (6)$$

при условии

$$\prod_{i=1}^n R_i \geq R_0,$$

где  $g_i$  – известные весовые коэффициенты, которые определяют по прототипу системы или по экспертным оценкам.

Таким образом, применение метода равномерного распределения обусловлено отсутствием необходимой информации на раннем этапе проектирования и дает, естественно, грубое приближение. Более того, нормы надежности, рассчитанные по формуле (2), для некоторых структурных элементов окажутся труднореализуемыми, так как будут приводить к существенному увеличению стоимости элемента, для которой существует некоторая нелинейная функциональная зависимость от показателя надежности [11, 17]. Применение методов пропорционального (3) и оптимального (5) распределения существенно улучшает качество решения [18, 19], но поиск решения часто затруднителен из-за неполноты исходных данных.

#### **Определение надежности с учетом постепенных отказов**

Известно, что каждый элемент и изделие в целом работоспособны, если определяющие их параметры лежат в пределах определенного допуска. Также известно, что в процессе эксплуатации вследствие износа, старения и под влиянием воздействия окружающей среды эти параметры могут изменяться. Средняя скорость такого процесса изменения может оцениваться по справочным данным или по данным эксплуатации изделий-аналогов. Очевидно, что чем меньше интервал допуска и чем больше значение скорости изменения параметров, тем сложнее обеспечить заданные требования надежности структурного элемента и, следовательно, выше будет его стоимость.

На ранних этапах проектирования можно приближенно считать, что ресурс, затрачиваемый на обеспечение надежности структурного элемента, пропорционален показателю надежности этого элемента [6, 11]. Таким образом, с учетом значений допусков на определяющие или выходные параметры элементов и данных, прогнозирующих изменение этих параметров, предлагается рассчитывать нормы надежности структурных элементов системы:

$$R_i = R^{\beta_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (7)$$

где

$$\beta_i = \left[ t_i \sum_{i=1}^n (t_i)^{-1} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$t_i = L_i V_i^{-1}, \quad (9)$$

$t_i$  – среднее время нахождения  $i$ -го параметра в интервале допуска;  $L_i$  – величина допуска;  $V_i$  – средняя скорость изменения определяющего параметра  $i$ -го элемента в процессе эксплуатации системы;  $L_i = B_i - A_i$ ,  $A_i$ ,  $B_i$  – известные границы допуска для определяющего параметра  $i$ -го элемента;  $0 < V_i < V_{0i}$ , где  $V_{0i}$  – заданная величина.

Легко заметить, что достоверность расчетов по формуле (8) и, следовательно, по формуле (7), зависит от точности вычисления величины  $t_i$ , так как при этом не учитывается положение номинальной (исходной точки) в поле допуска в начальный момент эксплуатации. С целью более точной оценки  $t_i$  необходимо рассматривать процесс изменения определяющего параметра подсистемы (структурного элемента). В работах [10, 13–16] были рассмотрены различные модели таких процессов [14–16], предложены способы и алгоритмы [11, 12] вычисления значений  $t_i$  для линейных и монотонных процессов [17, 19]. Для наиболее

распространенной на практике линейной модели определяющего параметра в виде  $X + V_i$ , где  $X$  и  $V$  – случайные величины, получены расчетные соотношения для различных вариантов: случайная величина  $X$  распределена или по равномерному закону, или по усеченному нормальному закону [5, 19].

Для распределения  $X$  и  $V$  по усеченному нормальному закону получено следующее выражение:

$$t_i = (L_i - 2\lambda_{2i}\sigma_{x_i})(m_{v_i} + \lambda_{1i}\sigma_{v_i})^{-1}.$$

Здесь  $m_{v_i}$  – математическое ожидание случайной величины  $V$ ;  $\sigma_{x_i}$  и  $\sigma_{v_i}$  – среднеквадратичные отклонения случайных величин  $X$  и  $V$ ;  $\lambda_{2i}$  и  $\lambda_{1i}$  – коэффициенты, определяемые из уравнений:

$$\Phi_0(\lambda_{1i}) = (1 - \gamma_{1i})\Phi_0\left(\left(V_{0i} - m_{v_i}\sigma_{v_i}^{-1}\right)\right) - \gamma_{1i}\Phi_0\left(m_{v_i}\sigma_{v_i}^{-1}\right);$$

$$\Phi_0(\lambda_{2i}) = 0,5 - \gamma_{2i},$$

где  $V_{0i}$  – детерминированная величина;  $\gamma_{1i}$  и  $\gamma_{2i}$  – коэффициенты, зависящие от  $R_0$  и определяемые по алгоритму, изложенному в работах [11, 12]:

$$\Phi_0(\lambda) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\lambda} \exp\left[-z^2/2\right] dz.$$

Таким образом, применяя для определения  $t_i$  методы и алгоритмы из работ [11, 12, 18], можно по формуле (7) рассчитать нормы и показатели надежности структурных элементов сложных систем с учетом прогнозируемого изменения этого параметра в процессе эксплуатации.

#### **Определение надежности с учетом внезапных и постепенных отказов**

В тех случаях, когда необходимо учитывать и внезапные, и постепенные отказы, будем полагать, что эти отказы наступают независимо друг от друга. При этом для расчета предлагается использовать следующие соотношения:

$$R_i = R^{K_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где

$$K_i = (\alpha_i + \beta_i) \left( \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \beta_i) \right)^{-1}, \quad (11)$$

$\alpha_i$  и  $\beta_i$  – вычисляются по формулам (4) и (8) с использованием справочных значений интенсивностей отказов и структуры подсистемы.

Выражение (11) получено при условии, что наступление внезапных и постепенных отказов происходит независимо друг от друга. Такое предположение часто принимают при практических расчетах, так как на ранних стадиях проектирования, как правило, нет достаточного объема достоверных данных для учета зависимости внезапных и постепенных отказов изделия. В противном случае, когда каким-либо способом удастся описать зависимость внезапных и постепенных отказов, способы расчета требований к надежности подсистем изделия существенно усложняются. В работах [15–19] исследованы варианты с зависимыми параметрами и рассмотрены частные случаи, когда удастся преобразовать систему зависимых случайных параметров в систему независимых, для которых можно использовать выражение (10).

#### **Заключение**

В дополнение к известным ранее способам определения требований надежности подсистем сложной системы по интенсивности отказов структурных элементов [2] предложены со-

отношения для оценки требований к надежности подсистем как с учетом только постепенных изменений параметров, так и с одновременным учетом внезапных и постепенных отказов. Разработанную методику определения требований к надежности элементов сложных технических систем предлагается применять на ранних этапах проектирования, когда отсутствие необходимой информации делает невозможным нахождение оптимального распределения норм надежности структурных элементов, обеспечивающее минимальную общую стоимость изделия. Помимо этого, методика определения надежности структурных элементов может применяться для проектирования высоконадежных систем бортовой радиоаппаратуры длительного функционирования, когда особую важность приобретают прогнозирование и учет изменений параметров систем в процессе эксплуатации.

### **Список литературы**

1. ГОСТ РВ 20.39.304–2003. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М. : Изд-во стандартов, 2003.
2. Садыхов, Г. С. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Г. С. Садыхов, В. П. Савченко, Н. И. Сидняев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. – 502 с.
3. Гарькина, И. А. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 3–11.
4. Гришко, А. К. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Д. В. Артамонов, В. А. Канакин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.
5. Гришко, А. К. Динамическая оптимизация управления структурными элементами сложных систем / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, Т. В. Жашкова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 134–141.
6. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
7. Кочегаров, И. И. Выбор оптимального варианта построения электронных средств / И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев, А. К. Гришко // Вестник Пензенского государственного университета. – 2015. – № 2 (10). – С. 153–159.
8. Гришко, А. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 35, № 2-1. – С. 16.
9. Гришко, А. К. Метод последовательного анализа моделей радиолокационных систем в процессе эксперимента / А. К. Гришко, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 178–179.
10. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
11. Гришко, А. К. Алгоритм управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 379–381.
12. Гришко, А. К. Синтез оптимальной структуры сети распределенных систем разнотипных радиоэлектронных средств / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, М. К. Танатов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2015. – Т. 1. – С. 299–301.
13. Гришко, А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели / А. К. Гришко // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». – 2015. – № 3 (47). – С. 85–90.
14. Гришко, А. К. Анизотропная модель системы измерения и анализа температурных полей радиоэлектронных модулей / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 82–88.
15. Andreyev, P. A. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors / P. Andreyev, A. Grishko, N. Yurkov // XIIIth International Conference

- Modern Problems of RadioEngineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 376–378. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452063.
16. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations / A. Grigor'ev, A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov, A. Micheev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
17. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // XIIIth International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). – Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
18. Grishko, A. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, N. Yurkov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, Russia, 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
19. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

---

**Гришко Алексей Константинович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

**Grishko Aleksey Konstantinovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio equipment design  
and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 621.396

**Гришко, А. К.**

**Определение показателей надежности структурных элементов сложной системы с учетом отказов и изменения параметров / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 51–57.**