

Определение вероятности безотказной работы сложных технических систем на основе обобщенных параметров их технического состояния

© Г.Н. Мальцев¹, В.Л. Якимов¹, А.Н. Калюта², С.С. Устинов¹

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

²15-я армия Воздушно-космических сил особого назначения

Рассмотрен подход к определению вероятности безотказной работы сложных технических систем на основе обобщенных параметров их технического состояния. Предполагается, что обобщенные параметры технического состояния сложной технической системы или ее подсистем формируются методом группового учета аргументов. Приведено общее выражение для расчета вероятности безотказной работы сложной технической системы по выборке значений обобщенного параметра ее технического состояния для заданного поля допуска. Показана возможность прогнозирования вероятности безотказной работы сложной технической системы в пределах интервала наблюдения по множеству значений обобщенного параметра ее технического состояния.

Ключевые слова: сложная техническая система, надежность, метод группового учета аргументов, обобщенный параметр технического состояния.

Введение. Диагностика и прогнозирование надежности является современным направлением в развитии теории и практики эксплуатации сложных технических систем (СТС) [1, 2]. Это в полной мере относится к технической эксплуатации радиолокационных систем дальнего обнаружения (РЛС ДО), представляющих собой СТС, которые поддерживаются в постоянной готовности к применению [3]. Поэтому при их эксплуатации обеспечение надежности функционирования имеет особое значение. В реальных условиях функционирования техническое состояние и текущие функциональные возможности таких СТС могут изменяться под влиянием эксплуатационных факторов и внешних воздействий. Контроль и прогнозирование технического состояния необходимы для своевременного принятия мер по поддержанию их готовности к применению и функциональных возможностей на требуемом уровне, а также планирования последующего применения по назначению.

В состав аппаратуры РЛС ДО входят датчики контролируемых параметров и встроенные средства технического диагностирования. С их помощью осуществляются оперативный контроль технического состояния и функционирования подсистем РЛС ДО по контролируемым

параметрам с использованием метода допусков. В то же время оценка работоспособности РЛС ДО в целом по совокупности контролируемых параметров может быть затруднена характерным для СТС взаимным влиянием контролируемых параметров, а в отдельных случаях — противоречивостью диагностической информации различных подсистем. В этих условиях для оценки состояния СТС по результатам их диагностического контроля используются обобщенные параметры технического состояния, позволяющие принимать решения по управлению СТС на основании интегральной оценки ее технического состояния, в том числе с упреждением во времени на основе прогнозирования надежности функционирования СТС. В настоящей статье рассмотрен подход к определению вероятности безотказной работы СТС на основе обобщенных параметров их технического состояния

Обоснование подхода к определению вероятности безотказной работы сложных технических систем на основе обобщенных параметров их технического состояния. Задача контроля технического состояния СТС характеризуется значительной размерностью ввиду большого количества контролируемых параметров и возможных функциональных состояний СТС и косвенным характером контроля функциональных возможностей и надежности СТС по большинству контролируемых параметров. Использование обобщенных параметров технического состояния СТС необходимо для сопоставления результатов диагностического контроля с различными множествами технических состояний и принятия решений по управлению техническим состоянием и применению СТС с требуемой эффективностью. При этом в зависимости от решаемых задач и условий применения оценка технического состояния СТС может состоять как в установлении работоспособного или неработоспособного состояния СТС [4], так и в определении состояния СТС в разных пространствах состояний, в частности, с учетом различных градаций частично работоспособных состояний [5].

При контроле технического состояния СТС различного назначения переход от множества отдельных контролируемых параметров к обобщенным параметрам, характеризующим техническое состояние анализируемой технической системы в целом, является общей задачей в комплексе задач технического диагностирования [6, 7]. В рассматриваемой задаче прогнозирования надежности СТС к общему требованию формирования обобщенных параметров технического состояния подсистем СТС или СТС в целом добавляется дополнительное требование возможности перехода от обобщенного параметра СТС к показателю ее надежности, который может быть спрогнозирован на заданный интервал времени.

При формировании обобщенных параметров технического состояния и функциональных возможностей РЛС ДО в качестве экспериментальных данных выступают параметры, контролируемые встроенными средствами технического диагностирования. Существует несколько подходов к формированию обобщенных параметров технического состояния СТС, среди которых в качестве универсального метода можно рассматривать использование формальных математических преобразований исходных контролируемых параметров СТС. Общей основой формирования обобщенных параметров СТС на основе формальных математических преобразований является метод группового учета аргументов [8, 9]. Метод предназначен для решения различных задач обработки экспериментальных данных и реализуется с помощью параметрических (полиномиальных) и непараметрических (использующих кластеризации или аналоги) алгоритмов.

В большинстве алгоритмов метода группового учета аргументов при обработке экспериментальных данных используется их полиномиальная свертка. Для формирования обобщенных параметров технического состояния СТС в качестве базисных функций могут быть использованы полиномы Колмогорова — Габора второго порядка. Формирование обобщенного параметра технического состояния СТС осуществляется на основе множества контролируемых параметров z_i , $i = 1, 2, \dots, M$. Их объединение при формировании обобщенного параметра Z осуществляется в соответствии с выражением

$$Z(z_1, z_2, \dots, z_M) = a_0 + \sum_{i=1}^M a_{1i} z_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{2ij} z_i z_j, \quad (1)$$

где a_0 , a_{1i} , a_{2ij} — коэффициенты полиномов нулевого, первого и второго порядка соответственно, с помощью которых осуществляется свертка исходных значений параметров z_i , $i = 1, 2, \dots, M$, при формировании обобщенного параметра Z .

Выражение (1) представляет собой модель формирования обобщенного параметра. Подбор коэффициентов преобразования значений контролируемых параметров в обобщенные параметры осуществляется итерационными методами с использованием алгоритмов оптимизации и настройки (обучения) модели. Однако это не является ограничением использования метода группового учета аргументов, поскольку подбор коэффициентов и обучение моделей осуществляются на этапе создания СТС.

Обобщенные параметры вида (1) представляют собой функции времени, которые изменяются в определенных пределах, характеризующих технические состояния СТС. Сопоставляя значения обобщенного

параметра Z с заданными допусками, можно определить вероятность нахождения их в каждом из рассматриваемых технических состояний СТС $\mathbf{Q}_n$, $n = 1, 2, \dots$, например в работоспособном, частично работоспособном и неработоспособном и определить вероятность безотказной работы СТС как вероятность ее нахождения в работоспособном состоянии.

В общем случае значение обобщенного параметра Z является случайной величиной. Для достоверного определения показателя вероятности безотказной работы СТС необходимо использовать множество из K значений обобщенного параметра ее технического состояния Z_k , $k = 1, 2, \dots, K$, в пределах некоторого (заданного) интервала наблюдения. При этом результаты определения значений обобщенного параметра на основе множества значений контролируемых параметров являются оценками $\hat{Z}_k$. Распределение значений обобщенного параметра Z_k , каждое из которых является сверткой значений M контролируемых параметров z_i , $i = 1, 2, \dots, M$, в пределах допусков, можно считать гауссовским. Распределение значений обобщенных параметров по закону, близкому к нормальному, является одним из требований, реализуемых при их формировании. Тогда в предположении гауссовской статистики значений поступающих в обработку оценок обобщенных параметров технического состояния СТС $\hat{Z}_k$ вероятность $P(\mathbf{Q}_n / \hat{Z}_k)$ нахождения СТС в состоянии $\mathbf{Q}_n$ при условии попадания обобщенного параметра Z в допуск $D_n(Z_k)$ определяется выражением

$$P(\mathbf{Q}_n / \hat{Z}_k) = \Phi \left(\frac{D(\hat{Z}_k) + M(\hat{Z}_k) - \bar{D}_n(Z_k)}{\sigma_n(Z_k)} \right) - \Phi \left(\frac{-D(\hat{Z}_k) + M(\hat{Z}_k) - \bar{D}_n(Z_k)}{\sigma_n(Z_k)} \right), \quad (2)$$

где $D(\hat{Z}_k)$ — доверительный интервал для текущих оценок $\hat{Z}_k$ значений обобщенного параметра; $M(\hat{Z}_k)$ — математическое ожидание текущих оценок $\hat{Z}_k$ обобщенного параметра; $\bar{D}_n(Z_k)$ — математическое ожидание интервала допустимых значений обобщенного параметра для технического состояния $\mathbf{Q}_n$; $\sigma_n(Z_k)$ — среднеквадратическое отклонение допустимых значений обобщенного параметра для техниче-

ского состояния Q_n ; $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$ — функция Лапласа.

В соответствии с выражением (2) определяются условные вероятности $P(Q_n / \hat{Z}_k)$ нахождения СТС в технических состояниях Q_n , $n = 1, 2, \dots$, по результатам оценки обобщенного параметра технического состояния СТС Z .

При гауссовской статистике значений обобщенного параметра Z_k можно полагать, что $D_n(Z_k) = \bar{D}_n(Z_k) \pm 3\sigma_n(Z_k)$. Тогда доверительный интервал для значений обобщенного параметра Z_k можно определить следующим образом: $D(\hat{Z}_k) = \pm 3\sigma(\hat{Z}_k)$, где $\sigma(\hat{Z}_k)$ — среднеквадратическое отклонение оценки обобщенного параметра $\hat{Z}_k$ от математического ожидания $M(\hat{Z}_k)$.

На рис. 1 показаны функции плотности распределения вероятностей значений обобщенного параметра технического состояния $f(Z_k)$ при нормальном функционировании СТС (рис. 1, а) и $f^*(Z_k)$ при отклонении от нормального функционирования (рис. 1, б). В первом случае функция $f(Z_k)$ с математическим ожиданием $M(Z_k)$ и размахом $\pm 3\sigma(Z)$ полностью попадает в пределы допуска $D_n(Z_k)$. Во втором случае в пределы допуска $D_n(Z_k)$ попадает только часть функции $f^*(Z_k)$. Если поле допуска $D_n(Z_k)$ соответствует работоспособному техническому состоянию СТС Q_n , то вероятность безотказной работы СТС в первом случае будет близка к единице, а во втором случае будет значительно меньше единицы.

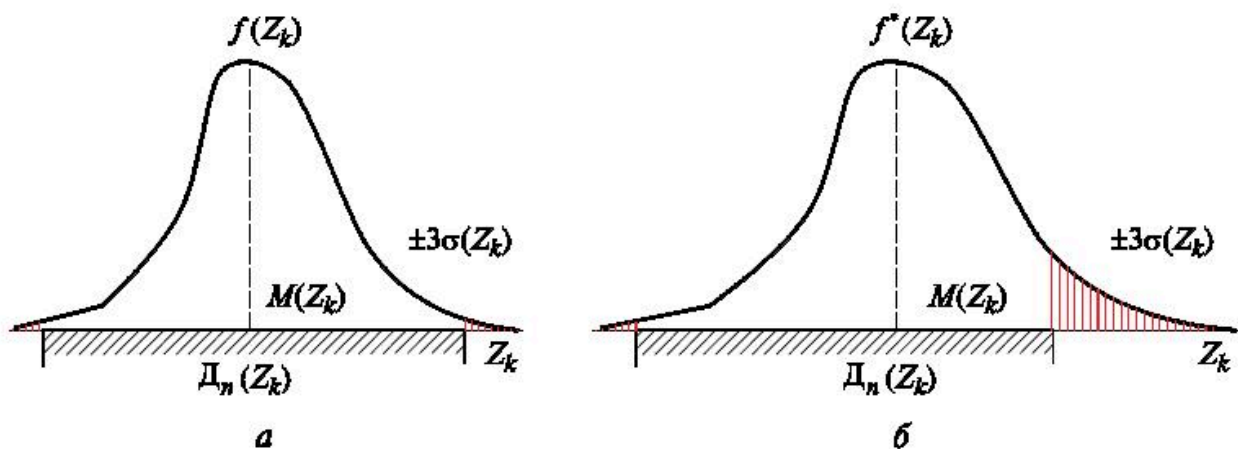


Рис. 1. Функции плотности вероятности распределения значений обобщенного параметра технического состояния СТС при нормальной работе СТС (а) и отклонении от нормы (б)

При оценивании вероятности безотказной работы СТС по временному ряду значений обобщенного параметра ее технического состояния необходимо определить требуемое количество отсчетов в пределах интервала наблюдения для прогнозирования вероятности безотказной работы СТС. Это требуемое количество отсчетов можно связать с доверительным интервалом для значений оценок обобщенного параметра. В случае представительной выборки для этого используется функция Лапласа. Доверительный интервал для значения оценки $\hat{Z}_k$ обобщенно-

$$\text{го параметра составляет } \left[M(\hat{Z}_k) - \frac{u_{кр} \sigma_n(\hat{Z}_k)}{\sqrt{K}}, M(\hat{Z}_k) + \frac{u_{кр} \sigma_n(\hat{Z}_k)}{\sqrt{K}} \right],$$

где K — количество отсчетов обобщенного параметра технического состояния СТС Z_k на интервале наблюдения; $u_{кр}$ — коэффициент, определяемый по таблицам Лапласа на основе требуемого значения доверительной вероятности γ и соотношения $\Phi(u_{кр}) = \gamma/2$. Например, при доверительной вероятности γ , соответствующей принадлежности значений обобщенного параметра технического состояния допуску $D(Z_k)$ и равной 0,9972, значение коэффициента $u_{кр}$ составляет $u_{кр} = 3$.

Практически функции плотности распределения вероятностей значений обобщенного параметра технического состояния $f(Z_k)$ строятся в виде гистограммы по значениям отсчетов Z_k , и существуют стандартизованные правила выбора оптимального количества интервалов гистограммы плотности распределения вероятности [10]. При достаточно общих предположениях о статистических свойствах обобщенного параметра Z требуемое количество его отсчетов Z_k в пределах интервала наблюдения K не зависит от большинства параметров закона его распределения и составляет 30–100 отсчетов.

С учетом того, что количество отсчетов контролируемых параметров СТС и, следовательно, количество отсчетов определяемого по ним обобщенного параметра составляет до нескольких десятков тысяч, скользящее окно наблюдения размером до нескольких сотен отсчетов вполне реализуемо и может быть использовано для получения в соответствии с выражением (2) оценки вероятности безотказной работы СТС на основе сформированной в соответствии с выражением (1) реализации обобщенного параметра ее технического состояния. При этом появляется возможность контролировать изменения вероятности безотказной работы СТС во времени на интервале наблюдения.

Пример определения вероятности безотказной работы технической системы на основе обобщенного параметра ее технического

состояния. Временные ряды, образованные значениями вероятности безотказной работы подсистем СТС и СТС в целом, имеют достаточно разнообразный характер, что обусловлено: во-первых, наличием в них трех наиболее выраженных участков (приработки, нормальной эксплуатации и старения), во-вторых, различиями в характере распределения отказов (распределение Вейбулла, нормальное, экспоненциальное, Рэлея), в-третьих, наличием случайной и детерминированной компонент, а также низкочастотного тренда. Однако при соответствующей настройке модели (1) формируемые обобщенные параметры позволяют получать оценки как текущих значений вероятности безотказной работы, так и ее прогнозных значений.

На рис. 2 представлены зависимости от времени функционирования на интервале эксплуатации вероятности безотказной работы $P_{б.р}$ подсистемы РЛС ДО (передатчика одной секции), полученные по контролируемым параметрам на основе метода допусков (кривые 1), и модельные зависимости, полученные с использованием методов прогнозирования обобщенных параметров технического состояния (кривые 2).

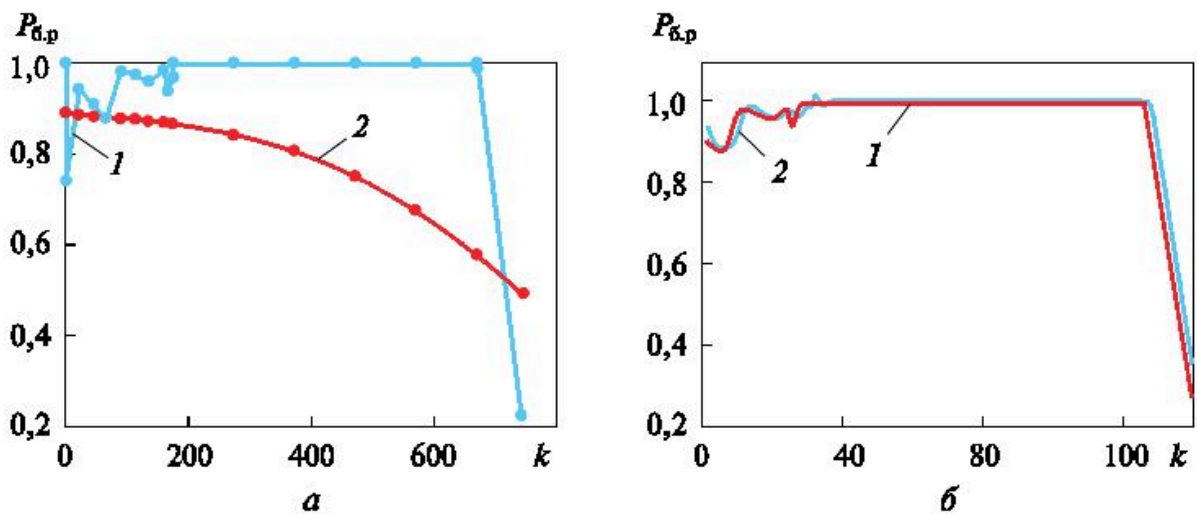


Рис. 2. Результаты прогнозирования вероятности безотказной работы в зависимости от времени функционирования подсистемы РЛС ДО

Время функционирования задается номерами дискретных отсчетов k . Для построения модельных зависимостей использовались линейные прогнозные модели деградации контролируемых параметров (рис. 2, а) совместно с краткосрочным прогнозом изменения вероятности безотказной работы во времени (рис. 2, б). Представленные зависимости показывают возможность достаточно точного краткосрочного и долгосрочного прогнозирования вероятности безотказной работы подсистем СТС.

Таким образом, возможно достоверное определение в пределах заданного интервала наблюдения вероятности безотказной работы СТС по множеству значений обобщенного параметра ее технического состояния. Временные ряды изменения обобщенных параметров подсистем СТС формируются по временным рядам их контролируемых параметров и являются исходными для формирования обобщенных параметров СТС в целом (при наличии нескольких иерархических уровней представления СТС — для формирования обобщенных параметров более высокого уровня иерархии). Состав учитываемых контролируемых параметров определяется матрицей преобразования, учитывающей их взаимосвязь и степень влияния на техническое состояние подсистем СТС. При этом распределение обобщенных параметров технического состояния СТС в пределах допусков, в отличие от распределения отдельных контролируемых параметров, можно полагать нормальным.

Заключение. Развитие систем контроля технического состояния и технического диагностирования в процессе эксплуатации и применения СТС по назначению является важным направлением развития информационных технологий мониторинга и управления техническим состоянием СТС. Встроенные системы контроля и диагностирования технического состояния представляют собой информационную часть замкнутой системы (контура) управления техническим состоянием и надежностью СТС. Выдача в систему поддержки принятия решения текущих и прогнозных значений показателей надежности функционирования СТС, рассчитанных по обобщенным параметрам технического состояния СТС, позволяет своевременно принимать решения по управлению эксплуатацией СТС и ее применением по назначению. Выбор обобщенных параметров технического состояния осуществляется на этапе создания СТС, и их формирование должно закладываться в логику функционирования контроля и диагностирования технического состояния СТС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александровская Л.Н. , Круглов В.И. , Кузнецов А.Г. *Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем*. Москва, Логос, 2003, 736 с.
- [2] Шубинский И.Б. *Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа*. Москва, «Журнал Надежность», 2012, 296 с.
- [3] Боев С.Ф. , Логовский А.С. , Линкевичиус А.П. *Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения*. Москва, Научная книга, 2019, 424 с.

- [4] Лобан А.В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов. Москва, Директ-Медиа, 2015, 146 с.
- [5] Потюпкин А.Ю., Галаев С.А., Истомина В.В. Военно-технический анализ. Основы системного исследования планирования развития и испытаний вооружения и военной техники. Москва, Издательство ГУЗ, 2022, 304 с.
- [6] Мальцев Г.Н., Якимов В.Л. Подход к формированию обобщенных параметров технического состояния сложных технических систем с использованием нейросетевых структур. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2023, т. 23, № 4, с. 828–835.
- [7] Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы. *Известия вузов. Приборостроение*. 2014, № 11, с. 7–15.
- [8] Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. *Моделирование сложных систем по экспериментальным данным*. Москва, Радио и связь, 1987, 116 с.
- [9] Половинкин А.И. *Основы инженерного творчества*. Москва, Машиностроение, 1988, 368 с.
- [10] Граничин О.Н., Поляк Б.Т. *Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах*. Москва, Наука, 2003, 291 с.

Мальцев Георгий Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры Космических радиотехнических систем Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. e-mail: vka@mil.ru

Якимов Виктор Леонидович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры Космических радиотехнических систем Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. e-mail: vka@mil.ru

Калюта Андрей Николаевич — канд. техн. наук, заместитель командующего 15-й армии Воздушно-космических сил особого назначения. e-mail: vka@mil.ru

Устинов Сергей Сергеевич — адъюнкт кафедры Космических радиотехнических систем Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. e-mail: vka@mil.ru

Determination of the probability of failure-free operation of complex technical systems based on generalized parameters of their technical condition

© G.N. Maltsev¹, V.L. Yakimov¹, A.N. Kalyuta², S.S. Ustinov¹

¹Military Aerospace Academy

²15th Army of the Special Air Force Appointment

The article discusses an approach to determining the probability of failure-free operation of complex technical systems based on generalized parameters of their technical condition. It is assumed that the generalized parameters of the technical condition of a complex technical system or its subsystems are formed by the method of group accounting of arguments. A general expression is given for calculating the probability of failure-free operation of a complex technical system by sampling the values of a generalized parameter of its technical condition for a given tolerance field. The possibility of predicting the probability of failure-free operation of a complex technical system within the observation interval by a set of values of the generalized parameter of its technical condition is shown.

Keywords: complex technical system, reliability, method of group accounting of arguments, generalized parameter of technical condition.

Maltsev G.N., Dr. Sci. (Eng.), Prof. of Space Radio Engineering Systems Department of Military Aerospace Academy. e-mail: vka@mil.ru

Yakimov V.L., Dr. Sci. (Eng.), Assoc. prof., Prof. of Space Radio Engineering Systems Department of Military Aerospace Academy. e-mail: vka@mil.ru

Kalyuta A.N., Ph.D. (Eng.), Deputy commander of the 15th Army of the Special Air Force Appointment. e-mail: vka@mil.ru

Ustinov S.S., Adjunct of Space Radio Engineering Systems Department of Military Aerospace Academy. e-mail: vka@mil.ru