

УДК 621.38.004:519.876.2

М.Ф. БАБАКОВ, И.И. ДЕРЮГА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ОПЕРАТИВНОЙ ГОТОВНОСТИ

Рассмотрена стратегия эксплуатации по фактическому состоянию радиоэлектронной аппаратуры, деградация определяющего параметра которой описывается однородным непрерывным Марковским процессом, при отсутствии мгновенной индикации отказов. Предложен метод расчета коэффициента оперативной готовности по характеристикам процесса деградации и параметрам стратегии эксплуатации. Данный метод позволяет еще на стадии проектирования при оптимизации параметров стратегии эксплуатации учесть требования, предъявляемые к коэффициенту оперативной готовности.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, эксплуатация по состоянию, коэффициент оперативной готовности, Марковский процесс, оптимизация, упреждающий допуск.

Введение

Методология системного проектирования технических объектов требует рассмотрения вопросов обеспечения их работоспособности на всех этапах жизненного цикла. Как известно [1], решение этой комплексной задачи обеспечивается целым рядом организационно-технических мероприятий, к основным из которых следует отнести:

- обеспечение высокой безотказности объекта за счет схемно-конструкторских мероприятий при проектировании;
- комплексные экспериментальные отработки при создании;
- проведение восстановительных аварийно-профилактических мероприятий при эксплуатации и применении.

Последняя группа мероприятий имеет особо актуальный характер и сводится к разработке и осуществлению стратегии выполнения профилактических работ (контроль, регулировки, предупредительные замены, отключение и подключение, другие мероприятия технического обслуживания) и аварийно-восстановительных работ (индикация отказов, аварийные отключения, подключение холодного и теплового резерва, операции текущего ремонта и т.п.).

Обеспечение работоспособности технических объектов на этапе эксплуатации может быть реализовано двумя принципами [2]:

- плано-предупредительным принципом эксплуатации по расходованию объектом ресурса;
- принципом управления по фактическому состоянию каждого объекта эксплуатации.

Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) различно-

го назначения, систем и устройств автоматики, приборов, машин и механизмов показывает, что более 50% всех отказов составляют постепенные (параметрических) отказы [3, 4]. С развитием контрольно-измерительной аппаратуры объем контролируемых параметров технических объектов расширяется, а точность их измерения увеличивается. Это позволяет отказаться от эксплуатации по ресурсу и перейти к эксплуатации каждого конкретного объекта в зависимости от его фактического состояния. Данный принцип позволяет наиболее эффективно предвосхищать отказы и повышать эффективность эксплуатации за счет максимально возможного использования запасов работоспособности каждого изделия [2].

В качестве модели деградации для описания процессов деградации РЭА используется однородный непрерывный Марковский процесс диффузионного типа, предложенный Стрельниковым В.П. [5].

Принцип полумарковской стратегии управления состоянием объекта, деградация определяющего параметра которого описывается однородным непрерывным Марковским процессом, для случая одностороннего ограничения области работоспособности и отсутствия мгновенной индикации отказов представлен на рис. 1 [6, 7].

Случай отсутствия мгновенной индикации отказа характерен для аппаратуры некритического применения, когда нежелательными, но допустимыми являются отказы между моментами контроля.

В процессе эксплуатации на основе дискретного измерения определяющего параметра объекта в моменты времени t_k ($k = 1, 2, \dots$) принимается решение о том, какие меры следует предпринимать относительно данного объекта.

Измеренное значение определяющего параметра может принадлежать одной из областей:

I – область, при нахождении процесса в которой никаких восстановительных работ проводить не нужно, а очередную проверку необходимо провести через время ΔT_j ($j=1,2,\dots,N$ – номер подобласти, в которой находится параметр), при этом чем сильнее определяющий параметр аппаратуры деградировал, тем чаще проводятся контрольно-измерительные работы, т.е. $\Delta T_1 < \Delta T_2 < \dots < \Delta T_N$;

II – область оптимальной остановки – необходимо проводить профилактические работы, а очередную проверку – через время ΔT_N ;

III – область отказа – необходимо проводить аварийно-восстановительные работы, а очередную проверку – через время ΔT_N .

Как при профилактических, так и аварийно-восстановительных работах объект переводится в «новое» состояние.

ΔT_1 – минимально возможная продолжительность эксплуатации до проведения следующих контрольно-измерительных работ, величины ΔT_j ($j=2,3,\dots,N$) обычно выбирают кратными ΔT_1 . T_k , T_n , T_a – средние длительности контрольно-измерительных, профилактических и аварийно-восстановительных работ соответственно (см. рис. 1)

При эксплуатации по состоянию параметрами оптимизации являются упреждающий допуск и границы между j -ми подобластями области работоспособности I. В случае двухстороннего ограничения области работоспособности оптимизируются два упреждающих допуска: нижний и верхний, а также возможна оптимизация по «новому» состоянию (если его значение не является фиксированным) [8].

1. Формулирование проблемы

Анализ публикаций [6,7] показывает, что для рассматриваемой стратегии задача оптимизации

эксплуатации решена только для следующих показателей качества функционирования: коэффициента готовности и средних удельных затрат. В то же время, важным комплексным показателем надежности является коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$), который в соответствии с ГОСТ 27.003-90 следует выбирать для восстанавливаемых объектов вида I конкретного назначения многократного циклического применения [9]. Поэтому, актуальной является задача по оптимизации по коэффициенту оперативной готовности.

В данной работе для рассматриваемой полумарковской стратегии эксплуатации предлагается метод, позволяющий по известным коэффициентам деградации Марковского определяющего параметра РЭА и параметрам стратегии эксплуатации определить коэффициент оперативной готовности и, таким образом, учесть требования к нему при оптимизации эксплуатации.

2. Марковская модель эксплуатации

Однородный непрерывный Марковский процесс полностью описывается плотностью вероятности перехода $\omega(x, x_0, \Delta t)$ из состояния x_0 в состояние x за времени Δt [10].

Для определения коэффициента оперативной готовности разобьем область изменения определяющего параметра технического объекта на конечное множество отрезков-состояний $G = \{0, 1, \dots, L\}$. Здесь L – состояние отказа, соответствующее выходу определяющего параметра объекта за границу области работоспособности. В соответствии со стратегией эксплуатации, если после контрольно-измерительных и восстановительных работ значение параметра находится в i -ом отрезке-состоянии (т.е. на отрезке $[x_{ни}; x_{ви}]$), которое принадлежит подобласти j ($j=1,2,\dots,N$), то очередная проверка будет проведена через время $\Delta t_i = \Delta T_j$.



Рис. 1. Принцип эксплуатации по состоянию при отсутствии мгновенной индикации отказа

Таким образом, наблюдаемый процесс деградации можно описать Марковской цепью со стационарными вероятностями перехода q_{ij} , которые находятся по следующим соотношениям [8]:

$$q_{ij} = \int_{x_{Hj}}^{x_{Bj}} \omega(x, \frac{x_{Hi} + x_{Bi}}{2}, \Delta t_i) dx, \quad (1)$$

где $\omega(x, x_0, \Delta t)$ – плотность вероятности перехода для случая отсутствия мгновенной индикации отказа.

При обнаружении отказа сразу же проводятся восстановительные работы, поэтому самопроизвольный переход объекта из состояний отказа не возможен:

$$\begin{cases} q_{Li} = 0, & i \in \overline{0, L-1}; \\ q_{LL} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Плотности вероятности перехода для однородного непрерывного Марковского процесса диффузионного типа при отсутствии мгновенной индикации отказа имеет следующий вид [8]:

$$\omega(x, x_0, \Delta t) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi\Delta t}} e^{-\frac{(x-x_0-a\Delta t)^2}{2b^2\Delta t}}, \quad (3)$$

где a, b – коэффициенты сноса и диффузии соответственно;

Стационарные вероятности перехода q_{ij} Марковской цепи удовлетворяют условиям [10]

$$q_{ij} \geq 0, \sum_{j=0}^L q_{ij} = 1, q_{iL} \geq 0, q_{0,0} = 1, q_{LL} = 1.$$

В каждый момент времени t_k на основании результатов проверки объекта принимается решение о том, что следует предпринимать относительно объекта.

Пусть d_{is} – решение изменить состояние системы от i до s при условии, что в момент контроля зафиксировано состояние i , тогда:

$$\begin{cases} D_{is} = P\{d_{is}\} \geq 0, & i \in \overline{0, L}, \\ \sum_{s=0}^L D_{is} = 1. \end{cases} \quad (4)$$

С учетом правил (4) изменение определяющего параметра во времени становится управляемым и описывается эргодическим Марковским процессом со стационарными вероятностями переходов [2]:

$$v_{ij} = \sum_{s=0}^L D_{is} q_{sj}, \quad i, j \in \overline{0, L}. \quad (5)$$

Стационарные вероятности состояний π_i полученного управляемого Марковского процесса на момент начала контрольно-измерительных работ определяется из системы уравнений Кормогорова [2]

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^L \pi_i v_{ij} = \pi_j, & j \in \overline{0, L}; \\ \sum_{j=0}^L \pi_j = 1, & \pi_j \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогично (5) находим стационарные вероятности состояний π_j^* на момент завершения контрольно-измерительных и восстановительных работ:

$$\pi_j^* = \sum_{i=0}^L \pi_i D_{ij}, \quad j \in \overline{0, L}. \quad (7)$$

Рассмотрим структуру матрицы решений D .

Пусть значение определяющего параметра технического объекта нового изделия принадлежит i_i -й отрезку-состоянию, а упреждающий допуск – i^* -му, тогда

$$\|D_{is}\| = \begin{cases} 1, & i = s \in \overline{0, i^* - 1}; \\ 1, & i \in \overline{i^*, L}, s = i_H; \\ 0, & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (8)$$

Приведем пример матрицы решений при $L = 9, i_H = 3, i^* = 6$ (указаны только элементы, отличные от нуля):

$$\|D_{is}\| = \begin{pmatrix} 1 & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

3. Метод расчета коэффициента оперативной готовности

В соответствии с ДСТУ 2860-94 коэффициент оперативной готовности определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет выполнять требуемую задачу в течение заданного интервала времени t_0 . Для стратегии эксплуатации по состоянию без наличия мгновенной индикации отказов под планируемыми периодами будем считать контрольно-измерительные и все восстановительные работы.

При определении $K_{o.r}$ можно выделить два эксплуатационных периода [11]: период предварительной эксплуатации и период выполнения задачи.

В первый период объект «готовится» к решению задачи. В этот период возможны различные восстановительные работы, направленные на поддержание надежности на определенном уровне и наиболее качественное выполнение поставленной задачи на последующем этапе. В течение этого периода чередуются интервалы, когда система способна начать выполнения поставленной перед ней задачи, и интервалы, когда система не способна выполнять эту задачу.

Второй период – это период решения задачи. При решении задачи обычно отменяются все плановые контрольно-измерительные и восстановительные работы. Выполнение объектом задачи требуется в некий произвольный, заранее неизвестный момент времени, поэтому качество функционирования объекта будет зависеть от состояния объекта в этот момент времени и от появления отказов во время работы.

Пусть в момент выполнения задачи значение определяющего параметра объекта равно x_1 , тогда вероятность выполнения задачи длительностью t_0 определяется по формуле

$$P(x_1, t_0) = \int_{-\infty}^{x_1 \delta} \omega_+(x, x_1, t_0) dx, \quad (10)$$

где $\omega_+(x, x_1, t_0)$ – плотностью вероятности перехода из состояния x_1 в состояние x за время t_0 при наличии мгновенной индикации отказа.

Для однородного непрерывного Марковского процесса диффузионного типа $\omega_+(x, x_1, t_0)$ имеет следующий вид [8]:

$$\omega_+(x, x_1, t_0) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t_0}} \left[\exp\left(-\frac{(x - x_1 - at_0)^2}{2b^2 t_0}\right) - \exp\left(-\frac{(x + x_1 - at_0 - 2x_{np})^2 - 4at_0(x_{np} - x_1)}{2b^2 t_0}\right) \right]. \quad (11)$$

Пусть $\pi_{\bar{a}}(x_1)$ среднестатистическое распределение значений определяющего параметра в начале выполнения задачи (второго периода), тогда с учетом этого начального распределения вероятность выполнения задачи и, следовательно, $K_{o.r}$ рассчитываются по формуле [10]

$$K_{\bar{a}}(t_0) = \int_{-\infty}^{x_1 \delta} \pi_{\bar{a}}(x_1) P(x_1, t_0) dx_1. \quad (12)$$

Пусть в начальный момент времени после проведенных контрольно-измерительных и восстановительных работ значение определяющего параметра объекта принадлежит i -му состоянию, тогда до на-

чала очередных контрольно-измерительных работ объект будет эксплуатироваться в течении Δt_i ; при этом плотность распределения определяющего параметра объекта в момент времени t [10]

$$\pi_i(x, t) = \omega\left(x, \frac{x_{i-1} + x_{\bar{a}i}}{2}, t\right). \quad (13)$$

С учетом того, что выполнение объектом задачи может потребоваться равновероятно в произвольный момент времени, среднестатистическое распределение параметра деградирующего из i -го состояния за время Δt_i , рассчитаем по формуле

$$\pi_i(x_1) = \int_0^{\Delta t_i} \omega_t(t) \pi_i(x_1, t) dt = \frac{1}{\Delta t_i} \int_0^{\Delta t_i} \pi_i(x_1, t) dt, \quad (14)$$

где $\omega_t(t)$ – равномерное распределение вероятности начала выполнения требуемой задачи.

Используя стационарные вероятности π_i^* и продолжительности эксплуатации Δt_i , можно определить среднее время эксплуатации объекта до очередных контрольно-измерительных работ по формуле

$$\Delta t_{cp} = \sum_{i=0}^{L-1} \pi_i^* \Delta t_i. \quad (15)$$

Тогда

$$\pi_{cp}(x_1) = \sum_{i=0}^{L-1} \frac{\pi_i^* \Delta t_i}{\Delta t_{cp}} \pi_i(x_1), \quad (16)$$

где $\frac{\pi_i^* \Delta t_i}{\Delta t_{cp}}$ – доля времени эксплуатации объекта из

i -го состояния от общего времени эксплуатации.

Таким образом, получим окончательное выражение для определения коэффициента оперативной готовности:

$$K_{o.r}(t_0) = \frac{1}{\Delta t_{cp}} \times$$

$$\times \sum_{i=0}^{L-1} \pi_i^* \int_{-\infty}^{x_{np}} \int_0^{\Delta t_i} \omega\left(x, \frac{x_{ni} + x_{\bar{a}i}}{2}, t\right) dt \int_{-\infty}^{x_{np}} \omega_+(x, x_1, t_0) dx dx_1.$$

Используя это соотношение в качестве целевой функции оптимизации, путем перебора возможных матриц решений D , можно найти оптимальное управление, максимизирующее коэффициент оперативной готовности.

Заключение

Предложенный в данной работе метод позволяет для эксплуатируемой по фактическому состоянию РЭА оценить коэффициент оперативной готовности по известным параметрам стратегии эксплуатации и плотности вероятности перехода, описывающей процесс деградации определяющего параметра. Таким

образом, данный метод может быть применен еще на стадии проектирования для оптимизации управлением состоянием РЭА с учетом требований, предъявляемых к коэффициенту оперативной готовности.

Литература

1. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. – Введ. 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995. – 38 с.
2. Барзилович Е.Ю. Эксплуатация авиационных систем по состоянию / Е.Ю. Барзилович, В.Ф. Воскобоев. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
3. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности / О.В. Абрамов. – М.: Наука, 1992. – 176 с.
4. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: Учебник / Л.Н. Александровская, Л.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – М.: Логос, 2003. – 208 с.
5. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
6. Berenguer C. *Inspection and maintenance plan-*

ning: an application of semi-Markov decision processes / C. Berenguer, C. Chu, A. Grall // Journal of Intelligent Manufacturing. – 1997. – Vol. 8, № 5. – P. 467-476.

7. Castanier B. *A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear / B. Castanier, C. Berenguer, A. Grall // Applied Stochastic Models in Business and Industry. – 2003. – Vol. 19, № 4. – P. 327-347.*

8. Бабаков М.Ф. Алгоритм управления состоянием электронной аппаратуры при диффузионной модели деградации определяющего параметра / М.Ф. Бабаков, И.И. Дерюга // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 1 (20). – С. 17-24.*

9. ГОСТ 27.003.90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. Введ. 01.01.92. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 27 с.

10. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М., «Сов. радио», 1977. – 488 с.

11. Барзилович Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович, В.А. Капитанов. – М.: Сов.радио, 1971. – 272 с.

Поступила в редакцию 12.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой, декан факультета РТС ЛА В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ СТАНОМ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ОПЕРАТИВНОЇ ГОТОВНОСТІ

М.Ф. Бабаков, І.І. Дерюга

Розглянуто стратегію експлуатації за фактичним станом радіоелектронної апаратури, деградація визначального параметра якої описується однорідним неперервним Марковським процесом, за відсутності миттєвої індикації відмов. Запропоновано метод розрахунку коефіцієнта оперативної готовності за характеристиками процесу деградації та параметрами стратегії експлуатації. Даний метод дозволяє ще на стадії проектування при оптимізації параметрів стратегії експлуатації врахувати вимоги до коефіцієнта оперативної готовності.

Ключові слова: радіоелектронна апаратура, експлуатація за станом, коефіцієнт оперативної готовності, Марковський процес, оптимізація, попереджувальний допуск.

THE OPERATIONAL AVAILABILITY FUNCTION OPTIMIZATION OF STATE CONTROL OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

M.F. Babakov, I.I. Deriuga

The state-based maintenance policy for radio electronic equipment under lack of failure instantaneous detection is considered. The basic parameter degradation of radio electronic equipment is described as homogeneous continuous-time Markovian process of diffusive type. The method for calculation of operational availability function by degradation process characteristics and maintenance policy parameters is offered. This method allows to take into account the requirement for operational availability function in design stage.

Key words: radio electronic equipment, state-based maintenance, operational availability function, Markovian process, optimization, scheduling threshold.

Бабаков Михаил Федорович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры производства радиоэлектронных систем Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Дерюга Иван Иванович – аспирант кафедры производства радиоэлектронных систем Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: dii@xai.edu.ua.