

УДК 621.38.004:519.876.2

М.Ф. БАБАКОВ, И.И. ДЕРЮГА

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

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА

Предложен оптимальный алгоритм эксплуатации по состоянию электронной аппаратуры, изменение определяющего параметра которой описывается однородным марковским процессом, для случая двухстороннего ограничения области работоспособности. Представлены зависимости для расчета матрицы вероятностей перехода, являющейся исходной информацией для рассматриваемого алгоритма, по параметрам непрерывного диффузионного процесса.

управление, оптимизация, марковский процесс, коэффициенты деградации, матрица перехода, целевая функция

Введение

Электронная аппаратура (ЭА) подвержена широкому спектру внешних воздействующих факторов. Кардинальным средством, обеспечивающим решение задачи поддержания надежного и эффективного функционирования работы ЭА при минимизации средних эксплуатационных затрат, является переход от традиционной системы эксплуатации (по ресурсу) к эксплуатации «по состоянию».

При проведении периодических проверок устанавливается техническое состояние систем (блоков) ЭА. В качестве параметров, характеризующих уровень технического состояния блоков, используют величину отклонения от номинального значения их выходных сигналов (отклонение величины выходного напряжения для блоков питания, отклонение от номинального значения частоты сигналов для различного рода стабилизаторов и генераторов частоты и т.д.).

Объем профилактических и восстановительных работ при эксплуатации по состоянию прямо пропорционален степени уменьшения работоспособности. Реализация этой стратегии позволяет сократить число отказов, вносимых при выполнении работ по обслуживанию, регулировкам, монтажу и демонта-

жу ЭА. Стратегия управления по состоянию позволяет экономить ЗИП за счет сокращения числа необоснованных замен. Коэффициент оперативной готовности систем, управляемых по состоянию, как правило, выше, чем у систем, управляемых по наработке.

Формулирование проблемы. В современной литературе [1] отмечается, что одной из наиболее адекватных моделей для описания процессов деградации электронной аппаратуры являются однородные непрерывные марковские процессы немонотонного диффузионного типа.

Анализ существующих методик определения оптимальной стратегии эксплуатации по состоянию показал, что большинство из них предполагают монотонное изменение параметра [2 – 5], одностороннее ограничение области работоспособности [2 – 6] или изначально заданное начальное значение параметра [2].

В данной работе представлен алгоритм, который оптимизирует стратегию эксплуатации по состоянию как по верхнему и нижнему упреждающим допускам, так и по начальному значению параметра. Данный алгоритм является дальнейшим развитием известного алгоритма определения оптимальной стратегии эксплуатации по состоянию системы с

параметрами марковского типа при одностороннем ограничении области работоспособности [2 – 4].

Конструктивные результаты по оптимальному управлению поведением определяющего параметра объекта эксплуатации получают при рассмотрении его в виде цепей Маркова, что требует знания матрицы стационарных вероятностей перехода [2 – 4, 6].

Электронные средства являются высокотехнологической и наукоемкой продукцией. Это делает экономически невыгодным проведение их испытаний для получения статистики наблюдений, чтобы, используя традиционные статистические методы, оценить значения матрицы стационарных вероятностей перехода [4]. В то же время коэффициенты старения ЭС можно определить по коэффициентам старения электрорадиоизделий (ЭРИ) и зависимости между контролируемым параметром и параметрами ЭРИ.

Предметом данной работы также является получение зависимостей для определения переходных вероятностей, используя взаимосвязь между цепью Маркова и непрерывным марковским процессом диффузионного типа, параметрами которого являются коэффициенты старения.

1. Алгоритм эксплуатации по состоянию

Следуя методике для построения алгоритма эксплуатации по состоянию при одностороннем ограничении области работоспособности [2 – 4], рассмотрим алгоритм для случая двухстороннего ограничения рабочей области определяющего параметра ЭА.

Пусть параметр, который характеризует работу ЭА, при ее эксплуатации проверяется в дискретные моменты времени $t = 0, 1, \dots$. Допустим, что область работоспособности этого параметра является двухсторонней и разделена на непересекающиеся отрезки – состояния, образующие конечное множество $G = \{0, 1, \dots, L\}$. Здесь 0 и L – состояния, соответствующие выходу параметра ЭС за нижнюю и верх-

нюю границу области работоспособности соответственно.

В дискретные равноотстоящие моменты времени параметр проверяется, в результате чего становится известно одно из его состояний $i \in G$. Предположим, что во времени последовательность измеряемых величин описывается марковской цепью со стационарными вероятностями перехода q_{ij} , которые удовлетворяют условиям:

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

В каждый момент времени на основании результатов проверки 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 . Выберем решения такими, что

$$\begin{cases} D_{is} = P\{d_{is}\} \geq 0, i \in \overline{0, L}; \\ \sum_{s=0}^L D_{is} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

С учетом правил (2) поведение системы во времени становится управляемым и описывается эргодическим марковским процессом со стационарными вероятностями переходов

$$v_{ij} = \sum_{s=0}^L D_{is} q_{sj}, \quad i, j \in \overline{0, L}. \quad (3)$$

Стационарные вероятности состояний π_i полученного управляемого марковского процесса с вероятностями переходов v_{ij} определяются из системы уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^L \pi_i v_{ij} = \pi_j, \quad j \in \overline{0, L}; \\ \sum_{j=0}^L \pi_j = 1, \quad \pi_j \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решения (2) могут привести к следующим исходам:

- оставить объект в наблюдаемом состоянии;

– изменить его состояние от i до $s \neq i$.

При осуществлении решений второго типа возможны предупредительные работы, если $i \in \overline{1, L-1}$, и ремонтные, если $i = 0, L$.

Введем затраты, связанные с изменением исследуемого параметра в процессе эксплуатации:

– затраты на контроль для определения состояния системы не зависят от номера состояния и равны c_0 ;

– затраты, связанные с принятием решения d_{is} , равны c_{is} и определяются как

$$c_{is} = \begin{cases} C_n, & i = \overline{1, L-1}, \quad s = \overline{1, L-1}; \\ C_p, & i = 1, L, \quad s = \overline{1, L-1}; \\ 0, & i = s \in \overline{0, L}, \end{cases} \quad (5)$$

где C_n – затраты, связанные с профилактической регулировкой параметра;

C_p – с аварийным восстановлением (ремонтом).

Тогда на основании теоремы о полном математическом ожидании для марковской цепи математическое ожидание затрат за один шаг

$$M[c] = c_0 + C_p \sum_{s=1}^{L-1} (\pi_0 D_{0s} + \pi_L D_{Ls}) + C_n \sum_{s=1}^{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} \pi_i D_{is} |_{i \neq s}. \quad (6)$$

Выражение (6) получено для случая, когда для идентификации состояния ЭА, в том числе и состояния отказа, необходимо контролировать параметр. Это эквивалентно отсутствию мгновенной индикации отказа, когда затраты на контроль не влияют на определение правила восстановления.

Рассмотрим теперь случай, когда такая мгновенная индикация отказа существует. Это означает, что затраты на контроль состояний отказов (0 и L) равны нулю. В этом случае выражение (6) примет вид:

$$M[c] = T_p \sum_{s=1}^{L-1} \pi_L D_{Ls} + (T_n + t_0) \sum_{s=1}^{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} \pi_i D_{is} |_{i \neq s}. \quad (7)$$

Определив значения $M[c]$, получим необходимые и достаточные условия для формулировки задачи по отысканию решений. Эта задача может быть сформулирована как следующая задача математического программирования: выбрать величины D_{is} так, чтобы значение средних удельных затрат, определяемое выражением (6), было минимальным при соблюдении условий (4), описывающих эволюцию марковской управляемой цепи.

Вследствие того, что выражения (4) и (6) являются линейными функциями неизвестных D_{is} , для их отыскания принципиально может быть использован алгоритм линейного программирования. Однако предварительно целесообразно ввести следующее обозначение:

$$x_{is} = \pi_i D_{is}. \quad (8)$$

Тогда целевая функция примет вид:

$$M[c] = c_0 + C_p \sum_{s=1}^{L-1} (x_{0s} + x_{Ls}) + C_n \sum_{s=1}^{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} x_{is} |_{i \neq s}, \quad (9)$$

а система ограничений (4) преобразуется как

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^L \sum_{s=1}^{L-1} x_{is} q_{sj} - \sum_{s=1}^{L-1} x_{js} = 0; \\ \sum_{j=1}^L \sum_{s=1}^{L-1} x_{js} - 1 = 0, \quad x_{js} \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

Задача решается относительно неизвестных x_{is} , а переход к решениям D_{is} осуществляется с помощью соотношения

$$D_{is} = \frac{x_{is}}{\sum_{s=0}^L x_{is}}. \quad (11)$$

Приведем пример матрицы решения (указаны только элементы, отличные от нуля):

$$\|D_{is}\| = \begin{pmatrix} \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Анализ матрицы решений показывает, что при нахождении процесса, например, в состоянии 2, его изменять не следует. Вообще, этому требованию удовлетворяют элементы матрицы решений, расположенные на главной диагонали (от 2 до 7).

Перейдем теперь к рассмотрению элементов матрицы решений типа D_{i0} , где $i = 0, 1, 8, 9$. В соответствии с введенными выше ограничениями (2) решение, например, D_{13} означает, что с вероятностью единица необходимо перевести процесс из состояния 1 (если он там окажется в момент контроля) в состояние 3, т.е. осуществить предупредительные работы (замену функционального элемента, регулировку и т.п.). Состояние 3 является «новым» и в него необходимо переводить параметр при проведении восстановительных работ.

Следовательно, область работоспособности можно разделить на три части (рис. 1):

I – область, при нахождении процесса в которой никаких восстановительных работ проводить не нужно;

II – область оптимальной остановки, необходимо проводить предупредительные работы;

III – область отказа, необходимо проводить ремонтные работы.

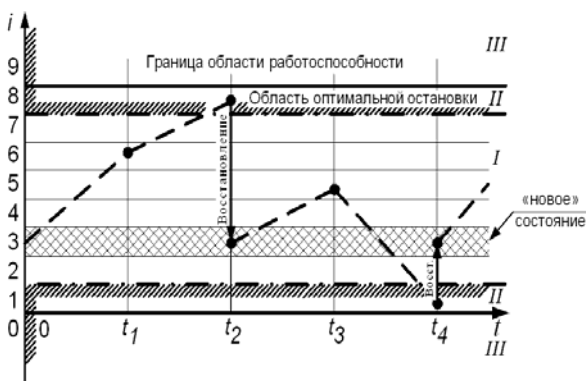


Рис. 1. Принцип эксплуатации по состоянию

На рис. 1 также нанесено условное изображение процесса изменения технического состояния ЭА, где результаты контроля в моменты t_1, t_2 изображены знаком \bullet . В момент $t = 0$ техническое состояние

наилучшее (состояние 3). В момент t_1 оно изменилось до состояния 6. В соответствии с матрицей решения (12) работы по его изменению проводить нецелесообразно. В момент t_2 при контроле было зафиксировано состояние 8, которое в соответствии с матрицей (12) должно быть изменено на состояние 0. Это означает проведение восстановительных работ. Далее процесс изменения технического состояния продолжается: в момент t_3 фиксируется состояние 5, и т.д.

При эксплуатации ЭА с учетом таких допусков эксплуатационные затраты, приходящиеся на единицу полезного времени использования ЭА, минимальны.

При эксплуатации ЭА часто возникает задача построения правила обслуживания, которое бы учитывало также и возможность удовлетворения дополнительных требований-ограничений.

Дополнительное ограничение, отражающее условие, чтобы вероятность отказа Q_0 на очередном шаге не превышала некоторого заданного значения ν , по аналогии с [3] имеет вид:

$$\sum_{i=0}^L \left(\sum_{j=1}^{L-1} x_{ij} q_{i0} + \sum_{j=1}^{L-1} x_{ij} q_{iL} \right) \leq \nu. \quad (13)$$

Введение ограничений может привести к увеличению средних удельных затрат, рандомизации решений и изменению значения упреждающего допуска.

Рассмотренный алгоритм определения оптимальной стратегии эксплуатации по состоянию легко реализуется с помощью систем компьютерной математики MathCad [7] и MatLab [8].

Адекватность данного алгоритма была проверена методом статистических испытаний процесса эксплуатации по состоянию гипотетического объекта с различными матрицами вероятностей перехода, при которых получены идентичные значения верхнего и нижнего упреждающих допусков и начального значения параметра.

2. Расчет матрицы стационарных вероятностей перехода

Рассмотрим зависимости для определения переходных вероятностей как для рассмотренного в данной работе алгоритма эксплуатации по состоянию при двухстороннем ограничении области работоспособности, так и для алгоритма при одностороннем ограничении области работоспособности. Для этого используем взаимосвязь между цепью Маркова и непрерывным марковским процессом диффузионного типа.

Марковские процессы диффузионного типа.

Непрерывные марковские процессы диффузионного типа полностью описываются плотностью вероятности перехода $\omega(t, x; t_0, x_0)$, которая удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова, представляющим собой дифференциальное уравнение в частных производных.

При решении данного уравнения необходимо задать граничные условия [9], которые зависят от вида реализаций процесса.

Рассматриваем процесс деградации как однородный, т.е. с постоянной средней скоростью и постоянным среднеквадратическим отклонением скорости (или постоянным коэффициентом вариации скорости). В таком случае уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова имеет следующий вид [1]:

$$\frac{\partial \omega(t, x; t_0, x_0)}{\partial t} + a \frac{\partial \omega(t, x; t_0, x_0)}{\partial x} - \frac{b^2}{2} \frac{\partial^2 \omega(t, x; t_0, x_0)}{\partial x^2} = 0, \quad (14)$$

где $\omega(t, x; t_0, x_0)$ – плотность вероятности перехода непрерывного марковского процесса из состояния x_0 в момент времени t_0 в состояние x в момент времени t ;

x, x_0 – значения определяющего параметра в моменты времени t и t_0 ;

a – коэффициент сноса (средняя скорость изменения определяющего параметра);

b – коэффициент диффузии (b^2 – средняя скорость изменения дисперсии определяющего параметра).

Начальные условия в самом общем случае, исходя из искомой функции $\omega(t, x; t_0, x_0)$, могут быть заданы, например, в виде

$$\omega(t, x; t_0, x_0)|_{t=t_0} = \omega_0(x_0), \quad (15)$$

где $\omega_0(x_0)$ – некоторое произвольное распределение исследуемого параметра в начальный момент.

Если начальное значение параметра x задано, тогда $\omega_0(x_0)$ вырождается в δ -функцию:

$$\omega(t, x; t_0, x_0)|_{t=t_0} = \delta(x - x_0). \quad (16)$$

Если идентификация процесса выхода параметра за пределы области работоспособности происходит только при контроле, то процесс изменения параметра ничем не ограничен и в качестве граничных условий принимают [1]:

$$\begin{aligned} \omega(t, x; t_0, x_0)|_{x=-\infty} &= \\ &= \omega(t, x; t_0, x_0)|_{x=+\infty} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Решение уравнения (14) с краевыми условиями (16), (17) известно в литературе как фундаментальное решение уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова и записывается в виде [9]:

$$\begin{aligned} \omega(t, x; t_0, x_0) &= \\ &= \frac{1}{b\sqrt{2\pi(t-t_0)}} \exp\left(-\frac{(x-x_0-a(t-t_0))^2}{2b^2(t-t_0)}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

Если существует мгновенная индикация отказа и область работоспособность является односторонней, то в качестве граничных условий при решении уравнения (14) принимают условия [1]:

$$\omega(t, x; t_0, x_0)|_{x=-\infty} = 0, \quad (19)$$

$$\omega(t, x; t_0, x_0)|_{x=c} = 0, \quad (20)$$

где c – допустимая граница изменения параметра $x(t)$.

Первое граничное условие (19) чисто формально, установленная левая граница является недостижи-

мой (естественной) и никак не влияет на процесс в заданной области.

Для того, чтобы первое достижение границы не-монотонной реализации моделировало отказ и дальнейшая реализация не участвовала в наблюдаемом процессе, необходимо на границе заданной области поставить граничное условие типа «поглощающий экран» (20).

Решение уравнения (14) для краевых условий (16), (19), (20) в [1] представлено при

$$t_0 = 0, \quad x_0 = 0, \quad c = 1$$

и записывается в следующем виде:

$$\omega(t, x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi t}} \times \exp\left(-\frac{(x-at)^2}{2b^2 t}\right) - \exp\left(-\frac{(x-at-2)^2 - 4at}{2b^2 t}\right). \quad (21)$$

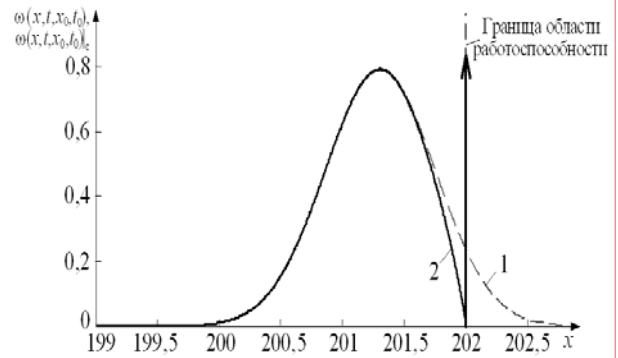
Можно легко убедиться, что общий вид зависимости $\omega(t, x; t_0, x_0)$ будет иметь вид:

$$\omega(t, x; t_0, x_0) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi(t-t_0)}} \times \exp\left(-\frac{(x-x_0-a(t-t_0))^2}{2b^2(t-t_0)}\right) - \exp\left(-\frac{(x+x_0-a(t-t_0)-2c)^2 - 4a(t-t_0)(c-x_0)}{2b^2(t-t_0)}\right). \quad (22)$$

Проверка данного выражения на соответствие требованиям уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова (14) и граничным условиям (19) и (20) была проведена в системе символьной математики Maple 9 и подтвердила его достоверность.

Введение поглощающей границы приводит к изменению поведения плотности вероятности перехода вблизи данной границы [9] (рис. 2), причем, как видно из сравнения (18) и (22), данное изменение в зависимости (22) обусловлено вторым слагаемым.

На рис. 2 вертикальной стрелкой на границе экрана показан тот факт, что некоторые реализации достигли допустимой границы – «поглощающего экрана» [9].



1 – график функции $\omega(t, x; t_0, x_0)$;

2 – график функции $\omega(t, x; t_0, x_0)|_c$

Рис. 2. Влияние поглощающей границы на плотность вероятности перехода

Аналогично при двухсторонней области работоспособности процесса и мгновенной индикации его отказа граничные условия будут следующими:

$$\omega(t, x; t_0, x_0)|_{x=c_1} = 0, \quad (23)$$

$$\omega(t, x; t_0, x_0)|_{x=c_2} = 0, \quad (24)$$

где c_1 и c_2 – нижняя и верхняя допустимые границы изменения параметра $x(t)$ соответственно.

Решение уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова при данных ограничениях в литературных источниках не найдено, поэтому найдем приближенное решение.

Проанализировав, как изменилось выражение для плотности вероятности перехода при введении одной поглощающей границы, можно предположить, что при двухстороннем ограничении $\omega(t, x; t_0, x_0)$ будет иметь вид:

$$\omega(t, x; t_0, x_0) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi(t-t_0)}} \times \left[\exp\left(-\frac{(x-x_0-a(t-t_0))^2}{2b^2(t-t_0)}\right) - \exp\left(-\frac{(x+x_0-a(t-t_0)-2c_1)^2 - 4a(t-t_0)(c_1-x_0)}{2b^2(t-t_0)}\right) - \exp\left(-\frac{(x+x_0-a(t-t_0)-2c_2)^2 - 4a(t-t_0)(c_2-x_0)}{2b^2(t-t_0)}\right) \right]. \quad (25)$$

Данное выражение удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова (14), а если пренебречь влиянием одной границы на распределение плотности вероятности возле другой, то граничные условия (23) и (24) также выполняются.

Плотность вероятности перехода непрерывного марковского процесса является двухпараметрическим распределением. Эти параметры могут быть определены с достаточной для инженерной практики точностью из априорной информации о физических процессах деградации элементов ЭА и зависимости определяющего параметра устройства от значения параметров элементов.

Расчетные формулы для получения матрицы стационарных вероятностей перехода. Для перехода к цепи Маркова, характеризующейся переходными вероятностями q_{ij} , разобьем область допустимых значений параметра на N малых непересекающихся отрезков-состояний. При этом распределение параметра в i -м состоянии (т.е. на отрезке $[x_{in}; x_{ie}]$) можно довольно точно аппроксимировать равномерным распределением $\omega_i(x_0)$ [10]:

$$\omega_i(x_0) = \frac{1}{x_{ie} - x_{in}}. \quad (26)$$

Плотность вероятности нахождения параметра в точке x в момент t , если в момент времени t_0 параметр находился в i -м состоянии, получается интегрированием произведения плотностей вероятностей $\omega_i(x_0)\omega(x, t, x_0, t_0)$ по всем промежуточным значениям i -го состояния [11]:

$$f(x, t) = \int_{x_{in}}^{x_{ie}} \omega_i(x_0)\omega(x, t, x_0, t_0)dx_0. \quad (27)$$

Тогда вероятность перехода из i -го состояния в j -е (т.е. на отрезок $[x_{jn}; x_{je}]$) с учетом того, что плотности вероятностей перехода (22) и (25) зависят от разности моментов времени ($\Delta t = t - t_0$), будет равна:

$$q_{ij} = \int_{x_{jn}}^{x_{je}} f(x, t)dx = \int_{x_{in}}^{x_{ie}} \int_{x_{jn}}^{x_{je}} \omega_i(x_0)\omega(x, x_0, \Delta t)dx dx_0, \quad (28)$$

где x_{in}, x_{ie} – нижнее и верхнее значения параметра, соответствующие i -му состоянию.

Так как при мгновенной индикации отказа плотности вероятности перехода (22) и (25) являются распределениями нахождения параметра, не достигшего границ области работоспособности (поглощающих экранов) [9], то для определения вероятности перехода в состояния отказа необходимо воспользоваться условием нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x, t)dx = 1. \quad (29)$$

Тогда необходимые выражения будут иметь вид:

– при одностороннем ограничении:

$$q_{iL} = 1 - \int_{x_{in}}^{x_{ie}} \int_{-\infty}^c \omega_i(x_0)\omega(x, x_0, \Delta t)dx dx_0, \quad i = \overline{0, L-1}; \quad (30)$$

– при двухстороннем ограничении:

$$q_{i0} = 1 - \int_{x_{in}}^{x_{ie}} \int_{c_1}^{\infty} \omega_i(x_0)\omega(x, x_0, \Delta t)|_{c=c_1} dx dx_0, \quad i = \overline{1, L-1}; \quad (31)$$

$$q_{iL} = 1 - \int_{x_{in}}^{x_{ie}} \int_{c_2}^{\infty} \omega_i(x_0)\omega(x, x_0, \Delta t)|_{c=c_2} dx dx_0, \quad i = \overline{1, L-1} \quad (32)$$

где $\omega(x, x_0, \Delta t)|_{c=c_1}$ и $\omega(x, x_0, \Delta t)|_{c=c_2}$ – плотности вероятности перехода при одностороннем ограничении на границах c_1 и c_2 соответственно.

Так как при обнаружении отказа сразу же проводятся восстановительные работы, то самопроизвольный переход параметра из состояний отказа не возможен, т.е. состояния отказа являются поглощающими состояниями:

$$q_{ji} = 0, q_{jj} = 1, \quad (33)$$

где j – состояния, соответствующие отказу;

i – работоспособные состояния.

Заключение

Таким образом, предложенный в данной работе алгоритм эксплуатации электронной аппаратуры по состоянию позволяет определить оптимальные значения как верхнего и нижнего упреждающих допусков, так и начальное значение определяющего параметра. Представлены зависимости для расчета матрицы стационарных вероятностей перехода по параметрам однородного диффузионного процесса. Это позволит определить алгоритм эксплуатации по априорной информации об электронной аппаратуре еще на стадии разработки, что особенно актуально для единичных изделий.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка оптимальных алгоритмов управления состоянием электронной аппаратуры, характеризующейся не одним, а двумя и более определяющими параметрами (например, для автогенератора – амплитуда и частота напряжения) [12].

Литература

1. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
3. Барзилович Е.Ю., Савенков М.В. Статистические методы оценки состояния авиационной техники. – М.: Транспорт, 1987. – 240 с.

4. Дедков В.К., Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем. – М.: Высш. шк., 1976. – 406 с.

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

6. Bruns P. Optimality of randomized strategies in a Markovian replacement model // Mathematical methods of operations research. – 2002. – Vol. 56, № 3. – P. 481-499.

7. Дьяков В.П. MATHCAD 8/2000: специальный справочник. – СПб: Издательство «Питер», 2000. – 592 с.

8. Дьяков В.П. MATLAB 6.5 SP1/& + Simulink 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.

9. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.

10. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Сов. радио, 1971. – 328 с.

11. Казаков В.А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. – М.: Сов. радио, 1973. – 232 с.

12. Nicolai R.P., Dekker R. Optimal Maintenance of Multi-Component Systems: a Review // Econometric Institute Report. – 2006. – № 29. – С. 35-38.

Поступила в редакцию 22.01.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.