

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 ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ МАРКОВСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

Представлена методика определения математической модели деградации определяющих параметров электронной аппаратуры по моделям деградации ее элементов описываемых однородным непрерывным марковским процессом немонотонного диффузионного типа. Предложена схема перехода от многомерного пространства состояний электронной аппаратуры к одномерному для определения оптимальной стратегии эксплуатации электронной аппаратуры.

электронная аппаратура, определяющий параметр, управление, оптимизация, марковский процесс, коэффициенты деградации, матрица перехода

Введение

Одна из важных и вместе с тем весьма сложных проблем, возникающих в процессе создания и эксплуатации технических систем и устройств, состоит в необходимости учета отклонений значений параметров технических объектов от расчетных и обеспечения требуемого качества их функционирования при наличии таких отклонений.

Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации электронной аппаратуры (ЭА) различного назначения, систем и устройств автоматики, приборов, машин и механизмов показывает, что более 50% всех отказов составляют постепенные (параметрических) отказы [1, 2]. Статистические данные о распределении отказов полупроводниковых приборов всех классов показывают, что 60 – 70% отказов в условиях эксплуатации обусловлены изменением электрических параметров (в основном это проявляется в виде роста обратных токов диодов и транзисторов, изменения коэффициента усиления и других связанных с ним параметров). Постепенные отказы составляют значительную часть отказов электровакуумных приборов (до 80%) [1, 2].

Процессы дрейфа параметров и вызываемые ими параметрические отказы заставляют проводить спе-

циальные мероприятия, направленные на поддержание требуемого уровня качества функционирования технических объектов. Осуществление таких профилактических и восстановительных мероприятий связано, как правило, с существенными материальными и временными потерями.

Кардинальным средством, обеспечивающим решение задачи поддержания надежного и эффективного функционирования работы технических объектов при минимизации средних эксплуатационных затрат, является переход от традиционной системы эксплуатации (по ресурсу) к эксплуатации “по состоянию” [3].

Формулирование проблемы. Для определения оптимального алгоритма управления состоянием технического объекта необходима математическая модель, описывающая деградацию определяющего параметра.

Электронная аппаратура является высокотехнологической и наукоемкой продукцией. Это делает экономически невыгодным проведение испытаний для получения математической модели деградации определяющего параметра. В тоже время для электрорадиоизделий (ЭРИ), из которых состоит ЭА, существуют математические модели, адекватно описывающие изменения их параметров.

Так, в работе [4] обосновывается аппроксимация процесса деградации ЭА однородным непрерывным марковским процессом немонотонного диффузионного типа. Использование марковских процессов в качестве математической модели эволюции параметров ЭА обусловлен деградационными процессами, протекающие в изделиях электронной техники (механические разрушения, интерметаллизация, электромиграция, теплоэлектрический пробой, генерация и перемещение зарядов на поверхности кристалла полупроводника, коррозия, плавление, образование поверхностных пленок, старение материалов).

Предметом данной работы является разработка методики определения параметров деградации определяющего параметра (параметров) ЭА по параметрам деградации (коэффициентам старения) ЭРИ и зависимостью между контролируемыми (определяющими) параметрами и параметрами ЭРИ.

1. Методика определения модели деградации определяющего параметра ЭА

Выходной параметр электронного средства можно рассматривать как функцию многих переменных: напряжения источника питания, параметров ЭРИ, дополнительных малых (паразитных) параметров в виде емкостей, проводимостей и индуктивностей, образующихся при монтаже ЭА, и так далее, т.е. [5]:

$$Y = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (1)$$

где Y – выходной параметр ЭА; q_1, q_2, \dots, q_n – параметры ЭРИ, источников питания и т. д.

Выходными параметрами ЭА в зависимости от его функционального назначения может быть как коэффициент усиления, амплитуда импульса, длительность импульса, величина выходного напряжения или тока и т. д.

Значение выходного параметра, вследствие деградации элементов, изменяется со временем и будет равно:

$$Y_0 + \Delta Y = \varphi(q_1 + \Delta q_1, q_2 + \Delta q_2, \dots, q_n + \Delta q_n), \quad (2)$$

где $Y_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ – начальные значения параметров; $\Delta Y, \Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n$ – отклонение параметров от начальных значений за время Δt .

По известной методике [5] устанавливаем взаимосвязь между изменением выходного параметра и изменениями параметров элементов:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \Delta q_i = \sum_{i=1}^n A_i \Delta q_i. \quad (3)$$

Будем считать значения коэффициентов влияния A_i постоянными для всей области работоспособности определяющего параметра, а процессы изменения параметров ЭРИ (q_i) – случайными процессами с независимыми приращениями, к которым относится и рассматриваемый однородный непрерывный марковский процесс немонотонного диффузионного типа. При этом приращения параметров Δq_i являются независимыми случайными величинами с плотностями распределения $f_i(\Delta q_i)$.

Тогда, с учетом (3) и выражений для линейного преобразования одномерных случайных величин и суммы независимых случайных величин [6], получим следующее соотношение для определения плотности распределения приращения определяющего параметра:

$$f(Y) = \frac{1}{|A_1|} f_1\left(\frac{\Delta q_1}{A_1}\right) * \frac{1}{|A_2|} f_2\left(\frac{\Delta q_2}{A_2}\right) * \dots * \frac{1}{|A_n|} f_n\left(\frac{\Delta q_n}{A_n}\right), \quad (4)$$

где * – символ операции свертки.

1.1. Марковский случай деградации параметров ЭРИ. В случае, когда деградация параметров ЭРИ описывается однородным непрерывным марковским процессом немонотонного диффузионного типа, плотность распределения приращения параметра имеет следующее выражение [4]:

$$f_i(\Delta q_i; \Delta t) = \frac{1}{b_i \sqrt{2\pi \cdot \Delta t}} e^{-\frac{(\Delta q_i - a_i \cdot \Delta t)^2}{2b_i^2 \cdot \Delta t}}, \quad (5)$$

где a_i – коэффициент сноса (средняя скорость изменения q_i параметра); b_i – коэффициент диффузии (b_i^2 – средняя скорость изменения дисперсии параметра q_i).

Так как плотности распределений приращений параметров ЭРИ являются нормальными, то плотности распределения приращения определяющего параметра (как сумма нормально распределенных случайных величин) также будет нормальным распределением [6].

Пользуясь (3) и (5) выведем формулы, устанавливающие связь между численными характеристиками распределения приращения выходного параметра ЭА и приращениями параметров ЭРИ.

По известным правилам теории вероятности, будем иметь следующие выражения для среднего значения абсолютной скорости изменения a и абсолютной средней скорости изменения дисперсии b^2 определяющего параметра ЭА:

$$a = \sum_{i=1}^n A_i \cdot a_i; \quad (6)$$

$$b^2 = \sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot b_i^2. \quad (7)$$

1.2. Экспериментальный способ определения параметров деградации. Если функциональная зависимость (1) выходного параметра ЭА от параметров схемы неизвестна, то численные значения коэффициентов влияния можно определить экспериментально [5].

Из линейности уравнений (3) следует принцип независимости действия приращений, т.е. возможность анализировать действия каждого приращения отдельно. Если собрать электронную схему с номинальными значениями параметров схемных элементов и дать приращение от номинала одному из них ($\Delta q_i \neq 0$), то отклонение выходного параметра ΔY на выходе схемы будет определяться только этим приращением, так как в уравнении приращения этой

схемы все другие члены будут равны нулю из-за отсутствия приращений от номинала у остальных элементов ($\Delta q_k = 0$), тогда:

$$A_i = \frac{\Delta Y}{\Delta q_i}. \quad (8)$$

Для экспериментального определения коэффициентов влияния можно пользоваться как реальной схемой, так и смоделированной в программах-имитаторах электронных схем: MicroCap, Electronics Work-bench, PSPICE.

При отсутствии информации о параметрах деградации ЭРИ коэффициенты сноса и диффузии определяющего параметра ЭА можно определить, используя результаты испытаний макета изделия.

Метод оценки характеристик процесса по единичной, достаточно продолжительной временной реализации, основан на гипотезе об эргодичности процесса. При этом реализации делятся на равные по времени интервалы и на основании статистики приращений параметра на этих интервалах вычисляются статистические характеристики параметров деградации. В данном случае выражения для оценок параметров диффузионных распределений имеют вид [7]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta x_i}{k \cdot \Delta t}; \quad (9)$$

$$b^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\Delta x_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta x_i \right)^2}{(k-1) \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

где Δt – интервал дискретизации реализации; Δx_i – приращение выходного параметра ЭА на i -м интервале ($i = 1, 2, \dots, k$).

2. Случай многомерного выходного параметра ЭА

Рассмотрим случай, когда состояние ЭА характеризуется не одним, а двумя и более определяющими параметрами (например, для автогенератора –

амплитуда и частота напряжения, для усилителя низкой частоты – коэффициент усиления на средней частоте, коэффициенты частотных искажений на низких и верхних частотах и полоса частот).

В литературе по оптимальному управлению состоянием объектов [8] отсутствует решение для данного случая. Обычно группа определяющих параметров сводится к одному, при этом уменьшается область работоспособности [4, 7].

Если область работоспособности каждого определяющего параметра Y_j разбить на конечное множество состояний $G_j = \{0, 1, \dots, L_j\}$ [3] и предположить, что контроль работоспособности проводится в дискретные моменты времени, то можно перейти от непрерывных марковских процессов, описывающих деградацию параметров, к цепи Маркова [3]. При этом множество возможных состояний объекта включает в себя декартово произведение множеств G_j [9].

Если изменения определяющих параметров Y_j независимы, то матрица стационарных вероятностей переходов объекта из одного состояния в другое определяется как прямое произведение матриц переходов каждого из определяющих параметров.

Представив таким образом n -мерное пространство состояний выходных параметров одномерным и получив матрицу стационарных вероятностей цепи Маркова, оптимальную стратегию управления состоянием объекта можно определить с помощью известных алгоритмов [3].

В большинстве случаев изменения определяющих параметров электронной аппаратуры обусловлены деградацией одних и тех же ЭРИ, т.е.:

$$\Delta Y_j = \sum_{i=1}^n A_{ji} \Delta q_i, \quad (11)$$

где A_{ji} – коэффициент влияния приращения i -го первичного параметра на приращение j -го выходного параметра.

Тогда приращения определяющих параметров будут коррелированы и для перехода к марковской цепи сначала необходимо определить совместную плотность распределения приращений определяющих параметров.

Для случая, когда ЭА характеризуется двумя определяющими параметрами, а приращения параметров ЭРИ являются независимыми и описываются выражением (6), совместным распределение будет двумерное нормальное распределение [10]:

$$\begin{aligned} \varphi(\Delta Y_1, \Delta Y_2; \Delta t) &= \\ &= \frac{1}{2\pi b_1 b_2 \cdot \Delta t \sqrt{1 - \rho_{12}^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1 - \rho_{12}^2)} \times \right. \\ &\times \left[\frac{(\Delta Y_1 - a_1 \cdot \Delta t)^2}{b_1^2 \cdot \Delta t} - \frac{2\rho_{12}(\Delta Y_1 - a_1 \cdot \Delta t)}{b_1 b_2 \cdot \Delta t} \times \right. \\ &\left. \left. \times (\Delta Y_2 - a_2 \cdot \Delta t) + \frac{(\Delta Y_2 - a_2 \cdot \Delta t)^2}{b_2^2 \cdot \Delta t} \right] \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где a_1, a_2, b_1, b_2 – коэффициенты сноса и диффузии выходных параметров Y_1, Y_2 соответственно; ρ_{12} – коэффициент корреляции между приращениями параметров Y_1, Y_2 .

Коэффициенты сноса и диффузии определяются по (6) и (7) соответственно.

Коэффициент корреляции определяется с помощью следующего выражения (см. пример № 3.15 [10]):

$$\rho_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{1i} A_{2i} b_i^2 (\Delta q_i)}{b_1 b_2}, \quad (13)$$

где A_{1i}, A_{2i} – коэффициенты влияния приращения параметра i -го ЭРИ на приращения определяющих параметров Y_1 и Y_2 соответственно; $b_i(\Delta q_i)$ – коэффициент диффузии параметра i -го ЭРИ.

Перейдя от непрерывного однородного Марковского процесса к цепи Маркова с учетом двумерного пространства определяющих параметров и пред-

ставив двухмерное пространство состояний ЭА одномерным, получим исходные данные для определения оптимальной стратегии управления состоянием электронной аппаратуры [3].

Заключение

Таким образом, предложенная в данной работе методика определения параметров процесса деградации определяющих параметров электронной аппаратуры по параметрам деградации ее электрорадиоизделий позволяет определить оптимальную стратегию управления состоянием электронной аппаратуры еще на стадии разработки по априорной информации об электрорадиоизделиях, что особенно актуально для единичных изделий.

Предложена схема определения оптимальной стратегии управления состоянием электронной аппаратуры, характеризующейся двумя и более определяющими параметрами.

Литература

1. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. – М.: Наука, 1992. – 176 с.

2. Маслов А.Я., Татарский В.Ю. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1972. – 264 с.

3. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.

4. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

5. Фролов В.А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС: Учеб. пособие. – К.: Выща шк., 1991. – 310 с.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.

7. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.

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

9. Харченко В.С., Черепяхин Д.А., Токарев В.И. Метод оценки живучести и безопасности невосстанавливаемых систем с многоступенчатой деградацией на основе использования Д-матриц // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2003. – № 2. – С. 56-63.

8. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи / Под ред. В.И. Тихонова. – М.: Сов. радио, 1980. – 544 с.

Поступила в редакцию 16.01.2007

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