

Методы прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам

А. Строгонов, д.т.н.¹

УДК 621.3.049.774 | ВАК 2.2.2

Современные радиоэлектронные системы для ответственных применений рассчитаны на эксплуатацию в активном или дежурном режимах на протяжении 15–20 лет. Продление срока службы этих дорогостоящих систем требует научного обоснования, которое базируется на прогнозировании долговечности используемых в них высоконадежных ИС. В настоящее время в России разрабатывают новый подход к оценке надежности ИС и полупроводниковых приборов с помощью математических методов прогнозирования. Минпромторг России в 2023 году выделил на эти цели более 450 млн руб. Проводимые исследования должны базироваться на новейших российских и мировых достижениях в таких областях, как анализ характеристик надежности, теория вероятностей, математическая статистика и автоматизированные методы проектирования изделий микроэлектроники с учетом эффектов старения. В статье рассмотрены основные методологические подходы, принятые в зарубежной и отечественной инженерных школах в области прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам.

ВВЕДЕНИЕ

Спектр методов прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам очень широк: методы теории катастроф и нечетких множеств, прогнозирование методами распознавания образов, имитационная физико-статистическая теория надежности, методы, основанные на анализе и прогнозировании рядов деградации контролируемых параметров, методы параметрической теории надежности (статистические и вероятностно-статистические методы прогнозирования), термодинамические методы прогнозирования, энергетически-временная модель деградации параметров ИС, эволюционно-энтропийная модель процесса деградации, феноменологический метод физического анализа и прогнозирования надежности, методы идентификации систем (ARX и ARMAX-модели) и др.

Многие теоретические исследования не были доведены до практического их применения. Почти все методы требуют разработки дополнительного программного обеспечения. Единственный подход, который широко используется на практике и имеет строгое математическое

обоснование, это подход с использованием статистических и вероятностно-статистических методов прогнозирования. Однако, для современных ИС с интенсивностью отказов порядка 10^{-9} 1/ч и менее, характеризующихся преобладанием параметрических отказов над катастрофическими, более эффективным оказался подход с использованием имитационной физико-статистической теории надежности.

Под «старением» в статистической теории надежности понимают явление постепенной утраты одного или нескольких свойств в расчетных условиях эксплуатации [1]. Существует и другое определение термина «старение». Например, в [2, 3] под старением подразумевают ухудшение показателей надежности с течением времени, то есть старение может означать возрастание с течением времени интенсивности отказов.

Старение характеризуется скоростью потери работоспособности, определяемой как внутренними индивидуальными особенностями конструкции ИС, так и внешними условиями эксплуатации. В отличие от старения, процесс постепенной утраты работоспособности в результате неблагоприятного сочетания внешних условий называется износом [2]. Если старение характеризуется какой-то усредненной скоростью потери работоспособности, то износ может быть определен как старение со скоростью, превышающей номинальную. Считается,

¹ Воронежский государственный технический университет, профессор кафедры твердотельной электроники, тел.: +7 (910) 247-14-70, andreistrogonov@mail.ru.

что износ для ИС не характерен, так как при эксплуатации ИС в радиоэлектронной аппаратуре не наблюдается период старения, характерный для кривой интенсивности отказов ИС, который выявляется только по результатам ускоренных испытаний [4].

Установлено, что деградация является отражением процессов перестройки дефектной структуры ИС. Кинетика деградации определяется условиями и режимом эксплуатации, при этом дефектная структура перестраивается, приобретая свойства, отвечающие измененным внешним условиям [5]. Параметры ИС являются прямым отражением состояния дефектной структуры и ее эволюции. Вносимые в дефектную структуру изменения и соответственно наблюдающиеся изменения параметров при эксплуатации могут быть либо обратимыми, либо необратимыми [5]. Считается, что после изготовления полупроводникового прибора его дефектная структура находится в потенциальной яме на вершине холма, высота которого характеризует степень неравновесности дефектной структуры, а крутизну склонов определяют условия эксплуатации [5].

На рис. 1 условно показан потенциальный рельеф, описывающий жизненный цикл полупроводникового прибора [5]. Срок службы прибора определяется эффективной длиной радиуса-вектора, проведенного из центра потенциальной ямы на уровень основания холма. При этом ориентация радиуса-вектора характеризует особенности эксплуатации полупроводникового прибора в выбранном режиме. Срок службы прибора будет максимальным при хранении в комфортных условиях (вектор *a*) или эксплуатации в щадящем режиме (вектор *b*), когда для перехода в равновесное состояние дефектная структура должна преодолеть высокий потенциальный барьер. При эксплуатации в штатном режиме (вектор *c*) величина потенциального барьера ниже. Это, однако, не означает, что в данном случае срок службы прибора будет меньше.

Для необратимого изменения параметров необходимо накопление определенной концентрации дефектов, присущих выбранному режиму эксплуатации. Происходящая при этом трансформация дефектной структуры может перевести ее в другую потенциальную яму, которых на пути эволюции может быть несколько [5].

Считается, что естественное старение ИС происходит в процессе их нормальной эксплуатации и в условиях хранения при оптимальных параметрах среды. Вынужденная деградация происходит под воздействием дестабилизирующих факторов, таких как радиация, механические и тепловые нагрузки и др. [6, 7].

В работе [6] развита концепция естественного старения ИС, основанная на учете электрон-решеточных взаимодействий, вызванных электронными возбуждениями. Выявлены механизмы, приводящие к старению двух

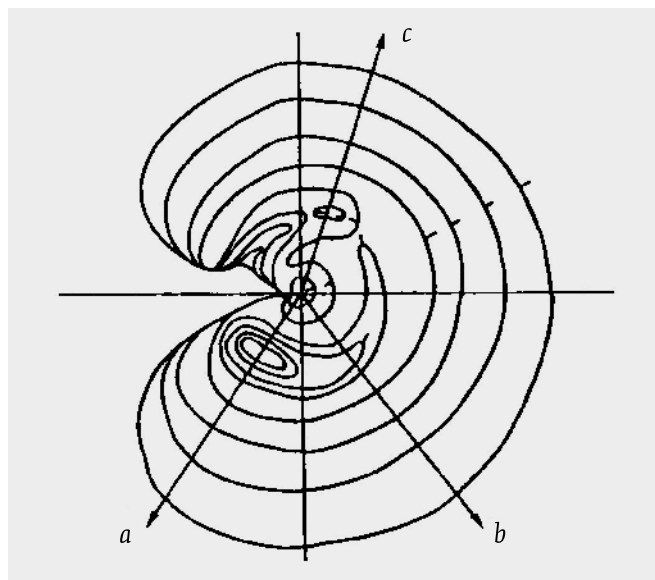


Рис. 1. Схема потенциального рельефа, определяющего эволюцию дефектной структуры в процессе эксплуатации полупроводникового прибора

типов: макроскопическое размытие примесных профилей (р-п-переходов) и микроскопическая перестройка дефектно-примесных комплексов.

ООО «Руднев-Шиляев»


 Разработка и создание измерительных систем и программного обеспечения



ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАКАЗЧИКА!

| | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. разработка измерительных систем по техническому требованию Заказчика 2. помощь в составлении технического задания Заказчика 3. производство измерительных систем | <ol style="list-style-type: none"> 4. разработка и производство приборов 5. разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика 6. сертификация измерительных систем и приборов |
|---|--|

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33, корп. 35
 www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru тел./факс: (495) 787-6367; 787-6368

Получение оценок долговечности ИС по результатам изучения процесса деградации параметров ИС представляется достаточно сложной задачей. Эволюционные процессы, протекающие в дефектной структуре, могут сопровождаться и улучшением параметров ИС. Зачастую многие важные электрические параметры ИС не изменяют своего значения вплоть до отказа, другие же не несут информацию, необходимую для прогнозирования долговечности, а лишь указывают на то, что схема в какой-то момент времени является работоспособной. Поэтому для предсказания долговечности приходится выбирать параметры, лишь косвенно характеризующие естественное старение, или те параметры, контроль которых является обязательным по ТУ.

На механизмы и скорость деградационных процессов оказывают влияние различные случайные возмущения (дефекты), исходно имеющиеся или возникающие в элементах конструкции ИС на различных этапах их жизненного цикла. В зависимости от степени влияния (размера) этих дефектов характер проявления отказов может носить детерминированный, полуслучайный или случайный характер. Если предположить, что дефекты отсутствуют или не оказывают влияния на скорость или механизмы деградационных процессов, то проявления отказов будут носить детерминированный характер, а изучение надежности ИС при известных механизмах отказов может проводиться аналитическими методами [8].

Если размеры дефектов малы, то есть их влияние сказывается только на скорости деградации, а не на механизме деградации, то проявление отказов может быть описано методами теории функций случайных аргументов [8]. Если в изделии имеются «грубые» дефекты, то есть дефекты, изменяющие механизмы и скорость деградационных процессов, то проявление отказов будет носить чисто случайный характер, и поэтому изучение надежности должно проводиться на основе методов теории вероятности и математической статистики [8].

Согласно работам [8–11] в теории надежности ИС выделяют три методологических подхода – физический, физико-статистический и статистический (вероятностный), которые позволяют прогнозировать количественные показатели надежности, такие как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы и др., а также время наступления параметрических отказов в выборке. Однако существуют и другие подходы. Это термодинамический подход [12], подход с использованием теории катастроф и нечетких множеств [13] и др. Из всего многообразия предложенных подходов прогнозирования долговечности ИС физико-статистический подход, основанный на решении физико-статистического уравнения, является наиболее законченным.

Разделяют краткосрочные и долгосрочные прогнозы технического состояния РЭА. Краткосрочное прогнозирование основано на изучении эволюции контролируемых

технических характеристик исследуемого объекта. Техническую характеристику (параметр) рассматривают как случайный процесс. Для оценки вероятности выхода параметра за поле допуска используют различные математические методы, основанные на отыскании распределения экстремальных значений, анализе многомерных плотностей распределений значений контролируемого параметра, канонических разложениях случайного процесса, марковской аппроксимации (дискретной модели) поведения контролируемых параметров. При долгосрочном прогнозировании технического состояния сложных РЭА, как правило, рассчитывают только показатели надежности. Это связано с трудностями прогнозирования поведения контролируемых параметров РЭА. Для ИС такой классификации не проводят.

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИС ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ОТКАЗАМ

В настоящее время в теории надежности уделяется большое внимание поиску выражений для основных количественных показателей (физико-статистический подход [8–11]), сущность которого заключается в предположении о доминирующем влиянии на надежность естественных деградационных процессов.

Пусть работоспособная ИС характеризуется N -мерным вектором технических характеристик X с компонентами X_1, X_2, \dots, X_N . Компонентами вектора технических характеристик X ИС могут быть, например, входное напряжение высокого уровня ($U_{\text{ВН}}$), входное напряжение низкого уровня ($U_{\text{Н}}$), выходное напряжение низкого уровня ($U_{\text{ОЛ}}$) и др. Параметры режимов и условия эксплуатации, деградационные процессы и статистические характеристики дефектов, на которые может оказываться прямое воздействие, рассматриваются как управляющие переменные. Обозначим эти переменные вектором U . Поскольку влияние возмущающих параметров проявляется фактически в виде случайных отклонений технических характеристик изделий от их номинальных значений, то эти параметры учитываются путем придания переменным состояния вероятностно-статистического смысла. Возмущения приводят к тому, что значения переменных состояния становятся случайными величинами. Для описания последних вводится зависящая от времени и управляющих переменных N -мерная функция плотности их совместного распределения $f(X, t, U)$. В качестве целевой функции выберем вероятность безотказной работы $P(t)$. Выражение для целевой функции имеет следующий вид [8]:

$$P(t, U) = \int_V f(X, t, U) dV,$$

где V – область допустимых значений технических характеристик изделий с элементом объема $dV = dX_1 dX_2 \dots dX_N$.

Необходимо найти такие значения управляющих переменных U , при которых значения количественных показателей надежности были бы в пределах заранее установленных границ. При заданных времени наработки t и минимально допустимой вероятности безотказной работы α необходимо отыскать область значений управляющих переменных $D(U)$, удовлетворяющую следующему критерию эффективности [9]:

$$P(t, U) = \int_V f(X, t, U) dV \geq \alpha \text{ для всех } U \in D(U).$$

Подынтегральная функция $f(X, t, U)$ является решением физико-статистического уравнения непрерывности для значений технических характеристик изделий [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t} f(X, t, U) + \text{div}(f(X, t, U)C(X, t, U)) = 0$$

с начальным условием $f(X, 0, U) = f_0(X, U)$, где $f_0(X, U)$ – функция плотности распределения исходных (в момент времени $t=0$) значений технических характеристик X ; div – оператор дивергенции N -мерный; $C(X, t, U) = dX/dt$ – вектор скоростей деградации.

В общем случае решение задачи возможно получить на основе априорной информации аналитическими или численными методами. Сформулированная задача относится к классу задач нелинейного программирования. Однако общего решения уравнения для прогнозирования количественных показателей надежности серийно выпускаемых современных БИС нет. Тем не менее, для некоторых частных случаев, когда исходное распределение и скорость деградации можно аппроксимировать достаточно простыми аналитическими функциями, можно получить искомое решение.

В работе [10] показано применение физико-статистического подхода на примере деградации тока потребления КМОП БИС в течение наработки 30 тыс. ч. Исходная плотность распределения значений параметра $I_{\text{пит}}$ имеет вид:

$$f_0(Y) = \frac{\exp(-Y/L)}{L(1-\exp(-1/L))}, \quad 0 \leq Y \leq 1,$$

где Y – вектор технических характеристик, состоящий из параметра $I_{\text{пит}}$; $[0, 1]$ – границы нормированных значений Y ; L – значение параметра распределения, равное $0,27$. Скорость деградации этой характеристики аппроксимируется зависимостью вида:

$$C[Y(t), E] = \frac{Y(0)}{1+E} \exp\{E - (E+1) \frac{Y(t)}{Y(0)}\},$$

где E – случайная, асимптотически нормально распределенная величина с характеристиками $M(E) = 0$, $\sigma(E) = 0,14$. В общем случае для достижения поставленной цели решается уравнение непрерывности [10]:

$$df/dt + \text{div}(fC) = 0,$$

$$f(Y, 0) = f_0(Y).$$

Решение этого уравнения методом Коши есть функция плотности [10]:

$$f(Y, t, E) = \frac{Z \exp(-ZY/L)}{L[1-\exp(-1/L)]}$$

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов имеют вид [10]:

$$P(t, E) = 1 - \exp(-Z/L) / [1 - \exp(-1/L)],$$

$$\lambda(t, E) = Z^2 \exp(-Z/L) / [L(1+E)(t+e)(1-\exp(-1/L))],$$

$$Z = 1 + E / [E + \ln(t + e)].$$

Таким образом, решение уравнения непрерывности позволяет получить важный вывод: скорость деградации является неявной функцией времени, то есть деградация носит автономный характер. При $t \rightarrow \infty \lambda(t)$ не зависит от исходного распределения значений технических характеристик $f_0(Y)$. Следовательно, влияние исходных статистических распределений на интенсивность отказов весьма значительно при малых временах наработки и существенно уменьшается при больших. Напротив, разброс скоростей деградационных изменений в материалах ИС гораздо сильнее проявляется при больших временах наработки, чем при малых [10].

В работе [8] авторы приводят вероятность безотказной работы и выражение для интенсивности отказов λ с учетом внезапных и постепенных отказов:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t q(t) dt\right) \int_{V_0} f_0(Z) (dZ/dX) dX_1 dX_2 \dots dX_N,$$

$$\lambda(t) = -\frac{\partial P}{\partial t} = q(t) + \frac{\int_{S_0} C f_0(Z) (dZ/dX) dS}{\int_{V_0} f_0(Z) (dZ/dX) dX_1 dX_2 \dots dX_N},$$

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные КОМПОНЕНТЫ
**для ПОВЕРХНОСТНОГО
МОНТАЖА**

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
 Tel.: (499) 158-7386, (495) 940-6244, (499) 943-8780

где $q(t)$ – имеет смысл интенсивности внезапных отказов, обусловленных грубыми дефектами; V_0 – элемент объема технических характеристик $\Delta V = \Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_N$; $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$ – N -мерный вектор частных интегралов, удовлетворяющих условию $Z(X, 0) = X$ системы уравнений в обыкновенных производных: $dX/dt = C(X, t)$; S_0 – часть поверхности S , охватывающей объем V_0 . Интегрирование проводится по поверхности S_0 , охватывающей объем V_0 , для которого скалярное произведение CdS положительно, что отражает условие о необратимости отказов. Для высоконадежных изделий предполагается отсутствие «грубых» дефектов и $q(t) = 0$. Тогда первые члены выражений для $P(t)$ и $\lambda(t)$ равны 1 и 0 соответственно, а сами выражения дают физико-статистические определения количественных показателей надежности.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ И ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИС

Долговечность ИС в условиях эксплуатации может быть оценена с помощью функций параметрической надежности [14]. Параметрическая надежность характеризует способность ИС сохранять уровень определяющих параметров X_1, X_2, \dots, X_n в границах соответствующих допусков $(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_n, b_n)$ в течение требуемого времени $(0, t)$ при заданных режимах и условиях эксплуатации. Критерием параметрического отказа служит критерий нарушения условия: $a_i \geq X_i > b_i, i = 1, 2, \dots, n$, а количественной мерой надежности – вероятность безотказной работы в течение времени $(0, t)$ или функция параметрической надежности: $P\{a_i \geq X_i > b_i, i = 1, \dots, n\}$.

На практике обычно используют некоторый обобщенный параметр $X(t)$ и рассматривают способность ИС сохранять уровень обобщенного параметра $X(t)$ в поле допуска в течение требуемого времени. Тогда математическое выражение для критерия отказа: $a \geq X(t) > b$. В качестве параметра $X(t)$ могут выступать не только контролируемые параметры ИС, но и параметры, характеризующие процесс деградации элементов конструкции ИС, например, изменение сопротивления токопроводящих дорожек алюминиевой металлизации вследствие электромиграции.

Обозначим вероятность выхода параметра $X(t)$ за границу поля допуска на интервале $[t, t + \Delta t]$ через $P_X(t)$, при условии, что в начальный момент времени t_0 параметр находился внутри поля допуска. Если процесс деградации по характеру поведения математического ожидания $X(t)$ является монотонным, то вероятность выполнения условия выхода за пределы допуска можно записать в виде:

$$dP_X(t) = P_X(t + dt) - P_X(t) = -[P_X(a < x < b, t + dt) - P_X(a < x < b, t)] = -d[F_X(x, t)] \Big|_a^b = dF_X(x, t) \Big|_a^b,$$

где $F_X(x, t)$ – закон распределения случайного значения параметра x в момент времени t . В теории случайных процессов $F_X(x, t)$ трактуют как функцию распределения вероятностей, которая определяется как вероятность события, заключающегося в том, что наблюдаемая случайная величина меньше или равна допустимому ее значению x , то есть $F_X(x) = P_X(X \leq x)$. Если $F_X(x, t)$ – нормальный случайный процесс, то:

$$F_X(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(t)} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x - m_x(t))^2}{2\sigma_x^2(t)}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x - m_x(t)}{\sigma_x(t)}} e^{-\frac{u^2}{2}} du,$$

где $u = (x - m_x(t)) / \sigma_x(t)$; $m_x(t)$ – математическое ожидание случайной величины X ; $\sigma_x(t)$ – среднеквадратичное отклонение.

В данном случае математическое ожидание m_x является технологически предопределенным значением параметра, к которому тяготеют ИС в партии. Стабильность математического ожидания для разных партий – свидетельство стабильности технологического процесса производства ИС. Напротив, существенные отличия в параметрическом поведении (нестабильность математического ожидания, существенные различия дисперсии параметра в разных партиях, непостоянство формы распределения) должны настораживать. Это признаки потенциальной ненадежности ИС.

Необходимо отметить сложность получения функций параметрической надежности. На практике функции параметрической надежности аппроксимируют нормальным распределением, которое удачно используется на протяжении многих лет для прогнозирования количественных показателей надежности ИС.

Необходимо отметить, что характеристики параметрической надежности можно получить, не доводя исследуемые ИС до отказа, а выяснив лишь характерную тенденцию временного поведения определяющего параметра. Это дает возможность сократить длительность испытаний ИС на долговечность. Тем не менее, в литературе отсутствуют практические примеры прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам с использованием функций параметрической надежности.

Для прогнозирования надежностных характеристик ИС по результатам ускоренных испытаний используют вероятностно-физические модели (диффузионные распределения), которые выгодно отличаются от строго вероятностных моделей тем, что их параметры могут быть вычислены как на основе статистики отказов, так и на основе статистики процесса деградации, а также путем совместного использования обоих типов информации [15, 16].

ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МИКРО- ЭЛЕКТРОНИКИ



ПРИГЛАШАЕМ
ПОСЕТИТЬ НАШ СТЕНД В1101
НА ВЫСТАВКЕ
EXPOELECTRONICA 2024

На фото изображён подъёмный механизм для антенны и фланец для подачи газов в реакторную камеру, расположенный на шлюзовой камере установки плазмохимического травления XORS 200С.



www.nppesto.ru



Разработка и производство технологического оборудования



Сервисное обслуживание технологического оборудования



Внедрение технологий



Обучение специалистов заказчика



Поставки зарубежного оборудования и комплексных технологий



Проектирование и строительство производств микроэлектроники



Модернизация технологического оборудования любой сложности



Технологический аудит производства

Элементы теории «диффузионных процессов» (Броуновский процесс) могут быть использованы для создания методов прогнозирования надежностных характеристик ИС. В настоящее время используются четыре вида двухпараметрических вероятностно-физических моделей отказов – альфа-распределение («верный» процесс), нормальное («сильно перемешанный» гауссовский процесс), DM- (diffusive monotonic, марковский монотонный процесс) и DN- (diffusive non-monotonic, марковский немонотонный процесс) распределения [15, 16].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИС С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ И ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Катастрофой называется скачкообразное изменение выходного параметра при плавном изменении управляющего параметра. В сущности, это понятие тождественно понятию отказа в теории надежности применительно к катастрофическим отказам. Теория катастроф базируется на теории особенностей гладких отображений (проектирование на плоскость каких-либо тел, например проектирование сферы на плоскость дает складку) и теории бифуркации динамических систем. При проектировании годографа вектора состояния ИС (считается, что эволюция процесса деградации определяется векторным полем в фазовом пространстве, вектор – параметр состояния ИС) на плоскость, образуются особенности типа складки и сборки – особые (бифуркационные) точки. Проекция точек складок или сборок образуют кривую катастроф [12].

Задача состоит в следующем. Рассматривается система, динамика которой принадлежит к градиентному типу, и делается попытка минимизировать некоторую функцию. В распоряжении имеется k параметров управления $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$, и при этом выходные параметры системы принимают такие значения $X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*$ в состоянии равновесия, что достигается локальная минимизация некоторой функции $\Psi(X_1, X_2, \dots, X_n; \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$, где Ψ является потенциальной функцией системы. Значения X_i^* , соответствующие состоянию равновесия, зависят от выбора параметров α_k . Рассматривая скачкообразные изменения значений X_i^* , происходящие в результате плавного изменения параметров α_k , приходим к понятию катастрофа. В общем случае функция Ψ неизвестна. Предполагается, что она является потенциалом, описывающим динамику данной системы.

Прогнозирующие модели процесса деградации технических характеристик ИС возможно представить с использованием разных канонических форм функции $\Psi(x, \alpha)$, имеющих полиномиальную структуру, в виде: $X_1^3 + \alpha X_1$ – складка; $X_1^4 + \alpha_1(X_1^2/2) + \alpha_2 X_1$ – сборка; $(X_1^5/5) + \alpha_1(X_1^3/3) + \alpha_2(X_1^2/2) + \alpha_3 X_1$ – ласточкин хвост. Критические точки $X_1^*(\alpha), X_2^*(\alpha)$ и т.д. получаются из решений уравнений $\partial\Psi/\partial X_1 = 0; \partial\Psi/\partial X_2 = 0$ и т.д.

Также предлагается использовать при прогнозировании долговечности ИС теорию нечетких множеств в виду большого числа влияющих факторов на долговечность ИС и недостаточно полного (четкого) знания о влиянии этих факторов на долговечность ИС [13].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Процесс деградации параметров ИС может быть эффективно описан с использованием метода Бокса – Дженкинса (АРСС-модель – авторегрессия проинтегрированного скользящего среднего, или ARIMA-модель), применяемого для анализа и прогнозирования нестационарных случайных процессов и временных рядов различной природы [17, 18]. В настоящее время метод Бокса – Дженкинса считается одним из наиболее эффективных при прогнозировании поведения параметров объектов и динамических систем, описываемых случайными временными рядами. Метод нашел широкое применение для стохастического моделирования интенсивности отказов деталей узлов различного рода радиоэлектронного оборудования, высокочастотных генераторов, используемых в бортовой аппаратуре, для построения прогнозов в рамках теории управления производственными процессами, в эконометрии.

Одним из преимуществ метода Бокса – Дженкинса перед другими методами прогнозирования является то, что он позволяет построить модели временных рядов деградации параметров ИС, которые можно использовать для прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам. Метод также позволяет прогнозировать долговечность ИС независимо от ее степени интеграции, конструктивных особенностей и учитывать влияние случайной составляющей (белый шум) на процесс деградации параметров. В отличие от методов теории распознавания не требуется предварительного исследования выборки, то есть разделения ИС в пространстве параметров на ряд совокупностей «группы схожести», проведение «обучения» и «распознавания».

Следует отметить, что существует хорошо развитое программное обеспечение для этого метода, способствующее его широкому применению в различных областях науки и техники. Для прогнозирования долговечности ИС возможно использовать статистические пакеты программ (СПП), позволяющие проводить анализ временных рядов, такие как пакет STATGRAPHICS (Statistical Graphics System), разработанный корпорацией STSC (США), пакет Statistica for Windows от Stat Soft, пакет GENSTAT, разработанный в Numerical Algorithms Group, пакет SPSS (Statistical Package for the Social Science) – статистический пакет для общественных наук и др. Разработан ряд отечественных программ анализа и прогнозирования временных рядов,

такие как ПАРИС и МАВР, STANP. Модуль СПП SPSS Trends позволяет с использованием ARIMA-моделей решать задачи управления производством и обработки данных, прогнозировать объемы продаж, проводить социальные исследования. Программный продукт Forecast Expert (система построения экономических прогнозов), базирующийся на методе Бокса – Дженкинса, предназначен для прогнозирования любого параметра, в отношении которого имеется должное количество замеров в конкретном промежутке времени. Всего насчитывается более десятка таких статистических пакетов.

Применение метода Бокса – Дженкинса для изучения долговечности ИС есть результат подхода к исследуемой ИС как к «черному ящику». Метод «черного ящика» – кибернетический: объект исследования представляется как некоторая кибернетическая система, которая может быть описана своим функциональным оператором. Такой подход ставит своей целью посредством построения некоторой модели установить изоморфизм не с внутренней структурой и ее функционированием, а с внешними проявлениями ее информативных параметров. Недостатком метода является то, что АРПСС-модель вытекающая из метода Бокса – Дженкинса не основывается на физических представлениях.

Метод Бокса – Дженкинса основывается на том, что гладкий нестационарный временной ряд путем взятия разностей некоторого d -го порядка можно свести к эквивалентному стационарному, то есть к случаю, для которого разработаны методы анализа и прогнозирования. В методе Бокса – Дженкинса нестационарный временной ряд представляется в виде модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС, ARIMA) в прямой и возвратной форме:

$$\begin{aligned} \text{прямая форма: } \varphi(B)\nabla^d X_t &= \vartheta(B)a_t, t = +1, +2, \dots, \\ \text{возвратная форма: } \varphi(F)\nabla^d X_t &= \vartheta(F)e_t, t = -1, -2, \dots, \end{aligned}$$

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p = 1 - \sum_{j=1}^p \varphi_j B^j = \text{AP-оператор,}$$

$$\vartheta(B) = 1 - \vartheta_1 B - \vartheta_2 B^2 - \dots - \vartheta_q B^q = 1 - \sum_{i=1}^q \vartheta_i B^i = \text{CC-оператор,}$$

где $\varphi(B)$, $\varphi(F)$ – операторы авторегрессии (АР); B , F – операторы сдвига; ∇ – оператор разности: $\nabla^d X_t = X_t - X_{t-1} = (1-B)X_t$; d – порядок разности, обеспечивающий переход от нестационарного ряда к эквивалентному стационарному; p – порядок авторегрессии; q , $\vartheta(B)$, $\vartheta(F)$ – порядок и операторы проинтегрированного скользящего среднего (СС) соответственно; a_t , e_t – последовательности независимых случайных величин, имеющих одинаковое нормальное распределение (белый шум): $E[a_t] = 0$, $\text{Var}[a_t] = \sigma_a^2$. Значения белого шума a_t , согласно методу Бокса – Дженкинса, должны быть получены прогнозированием назад с использованием возвратной формы временного ряда.

Смешанный процесс АР и СС представляет собой эффективную модель для описания стационарных и нестационарных временных рядов. АРПСС-модель эффективна, когда временной ряд является суммой независимых составляющих, каждая из которых описывается либо моделью АР, либо моделью СС, но которые непосредственно не наблюдаются. Модель является параметрической. Чтобы подобрать такую модель, нужно оценить по наблюдаемым данным набор параметров АРПСС-модели φ , ϑ , σ_a .

Согласно авторегрессионной модели формирования сигнала, он формируется путем пропускания дискретного белого шума через рекурсивный фильтр, в модели скользящего среднего (СС-модель) используется нерекурсивный фильтр, а в АРПСС-модели – фильтр общего вида, содержащий рекурсивную и нерекурсивную ветви. Фильтры АРПСС имеют обратную связь, обладают большой гибкостью, экономичны, то есть малое число параметров в левых и правых частях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье кратко рассмотрены различные подходы, которые возможно использовать для прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам, базирующиеся на методах, заимствованных из различных областей науки и техники, таких как статистика и теория вероятностей, теория распознавания образов и теория катастроф, теория временных рядов, термодинамика и др. С математической точки зрения применение этих методов для прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам не имеют ограничений.

Следует отметить, что в настоящий момент ни одним из рассмотренных методов прогнозирования долговечности ИС по параметрическим отказам не получены сведения о фактической долговечности ИС в условиях эксплуатации РЭА. Однако в современной работе [19] проведена верификация физико-статистического подхода теории надежности для простейших случаев, показавшая его правомочность.

Обзор литературных источников показывает, что наиболее отработанными с точки зрения математического аппарата и программного обеспечения являются методы, основанные на теории временных рядов и позволяющие по траекториям процесса деградации параметров ИС прогнозировать долговечность ИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ушаков И.А.** Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. М.: Радио и связь, 1991. 132 с.
2. **Барлоу Р., Прошан Ф.** Математическая теория надежности / Пер. с англ.; под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Сов. радио, 1969. 537 с.

3. **Барлоу Р., Прошан Ф.** Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Пер. с англ. И.А. Ушакова. М.: Наука, 1984. 452 с.
4. **Строгонов А.В.** Характеристики надежности современных ПЛИС // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2019. № 4. С. 52–58.
5. **Соколов В.И.** Проблемы микроэлектроники (1. Диффузия. 2. Дефектообразование. 3. Деградация) // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29. С. 842.
6. **Горин Б.М., Кив А.Е., Плотникова Л.Г. и др.** Механизмы естественного старения и вынужденной деградации полупроводниковых приборов // Обзоры по электронной технике, 1983. 57 с. Серия «Полупроводниковые приборы».
7. **Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др.** Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Радио и связь, 1990. 184 с.
8. **Алексанян И.Т., Черняев Н.В.** Обобщенная модель надежности изделий // Известия вузов. Электроника. 1998. № 1. С. 85–90.
9. **Алексанян И.Т., Черняев Н.В.** Выражения для основных количественных показателей надежности в физико-статистическом подходе // Петербургский журнал электроники. 1994. № 1. С. 56–58.
10. **Алексанян И.Т., Черняев Н.В.** Метод изучения надежности интегральных микросхем // Микроэлектроника. 1992. Вып. 2. Т. 21. С. 105–111.
11. **Алексанян И.Т., Черняев Н.В.** Управление надежностью интегральных микросхем на основе информационной избыточности // Известия вузов. Электроника. 1998. № 7. С. 62–66.
12. **Малков Я.В.** Диагностика деградационных процессов в полупроводниковых структурах с позиций междисциплинарных теорий // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 5. С. 77–82.
13. **Дубицкий Л.Г.** Предвестники отказов в изделиях электронной техники. М.: Радио и связь, 1989. 96 с.
14. **Сыновров В.Ф., Пивоварова Р.П.** Параметрическая надежность и физические модели отказов интегральных схем. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1983. 152 с.
15. **Погребинский С.Б., Стрельников В.П.** Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.
16. **Стрельников В.П.** Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры // Надежность и контроль качества. 1989. № 9. С. 3–7.
17. **Алексанян И.Т., Кривошапко В.М., Романов А.А.** Построение модели параметрической надежности ИС по данным о деградации их характеристик и имитация испытаний на ЭВМ // Электронная техника. 1979. Вып. 1. С. 15–19. Серия «Микроэлектроника».
18. **Алексанян И.Т., Кривошапко В.М.** Моделирование параметрических отказов и изучение надежности интегральных схем // Электронная техника. 1981. Вып. 4. С. 52–57. Серия «Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания».
19. **Кожевников В.С., Матюшкина И.В., Черняев Н.В.** Анализ основного уравнения физико-статистического подхода теории надежности технических систем // Математические основы и численные методы моделирования. 2020. Т. 12. № 4. С. 721–735.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ПЛИС И ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ. ПРОГРАММНЫЕ ОШИБКИ И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Под ред. Ф. Кастеншмидт, П. Реха

При поддержке АО «Конструкторско-технологический центр «ЭЛЕКТРОНИКА»

Пер. с англ. и научная редакция С. А. Цыбина, к. т. н., АО «КТЦ «ЭЛЕКТРОНИКА»,

А. В. Быстрицкого, к. т. н., АО «КТЦ «ЭЛЕКТРОНИКА»,

А. В. Строгонова, д. т. н., ФГБОУ ВО «ВГТУ», П. С. Городкова, ФГБОУ ВО «ВГТУ»

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 326 с.,
ISBN 978-5-94836-513-8

Цена 920 руб.

В книге приводится понятие устранимых ошибок, возникающих в ПЛИС типа ППВМ (FPGA – Field Programmable Gate Array) и графических процессорах. Рассматриваются радиационные эффекты в ПЛИС, отказоустойчивые методы для ПЛИС, применение серийно выпускаемых ПЛИС в авиации и космонавтике, экспериментальные данные о воздействии радиации на ПЛИС, встроенные в ПЛИС процессоры под воздействием радиации и внесение ошибок в ПЛИС.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru