УДК 621.382.019.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Известно, что постепенные отказы, отражающие внутренне присущие материалам изделиям электронной техники (ИЭТ) свойства, в частности старение, в принципе исключить невозможно. Эти отказы называют также деградационными. Их критериями являются уровни изменения электрических функциональных параметров, выше или ниже которых ИЭТ согласно технической документации или с учётом требований потребителя считается имеющим отказ. Постепенные отказы определяют такое понятие как параметрическая надёжность ИЭТ [1].

Параметрическая надёжность характеризует способность ИЭТ сохранять уровень функционального параметра $y(t)$ в пределах установленных норм (от a до b) в течение заданного времени t_3 при выбранных режимах и условиях работы.

В качестве количественной меры уровня параметрической надёжности за время работы t_3 используют вероятность вида:

$$P_{\text{п}}(t_3) = P\{\, a \le y(t) \le b,\ t \le t_3\}, \qquad (1)$$

где символ P означает вероятность.

В работе [2] на примере мощных биполярных транзисторов типа КТ872А было показано, как оценивать значение вероятности $P_{\text{п}}(t_3)$ на основе использования физико-статистических моделей деградации функциональных параметров (статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером, напряжение насыщения коллектор–эмиттер). Предложенный для этого метод позволяет экспериментально с использованием физического моделирования деградации рассматриваемого функционального параметра ИЭТ и статистического анализа результатов моделирования получать физико-статистическую модель деградации этого параметра. Для рассматриваемого типа ИЭТ её находят один раз с помощью предварительных исследований, испытывая на надёжность выборку ИЭТ, называемую обучающей. Построенная физико-статистическая модель деградации позволяет в начальный момент времени применительно к другим выборкам этого же типа ИЭТ решать задачу группового прогнозирования в виде определения вероятности того, что функциональный параметр ИЭТ в течение интересующего времени работы t будет находиться в пределах заданных норм. В работе [2] была принята гипотеза о нормальном распределении функциональных параметров ИЭТ во временных сечениях. Достоверность прогнозирования параметрической надежности в случае этой гипотезы оказалась удовлетворительной для практики. Однако возникает вопрос, какую достоверность прогнозирования обеспечат другие правдоподобные гипотезы, используемые для получения физико-статистических моделей деградации. Этим и объясняется актуальность исследований и интерес к ним работников промышленности.

В работе [2] в качестве физико-статистической модели деградации параметра $y(t)$ рассматривалось аналитическое выражение его условной плотности распределения $w(y/t)$ для интересующего времени t. Это выражение может быть получено путём математических преобразований начального распределения $w(y/t = 0)$:

$$w(y / t = t_3) = \psi\,[w(y / t = 0, t_3)], \qquad (2)$$

где ψ – символ функциональной зависимости.

Физико-химические характеристики деградации функционального параметра $y(t)$, получаемые усреднением по исследуемой обучающей выборке ИЭТ, вошли в виде коэффициентов в правую часть равенства (2). Значение интересующей вероятности $P_{\text{п}}(t_3)$ является результатом изменения статистического распределения параметра $y(t)$ за время работы t_3 (рисунок 1).

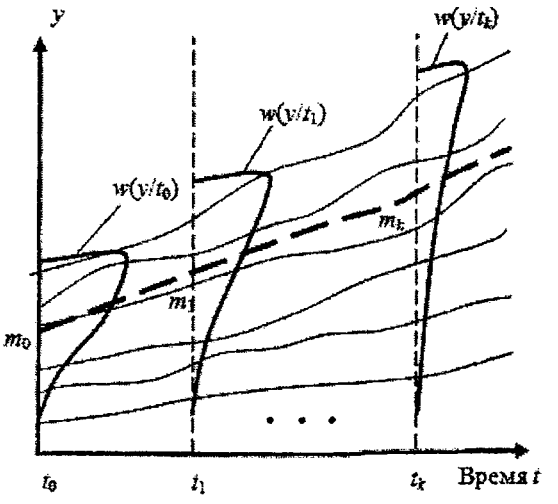


Рисунок 1 – Изменение плотности распределения параметра y при работе ИЭТ: $t_0, t_1, \ldots, t_k$ – моменты времени – временные сечения; $m_0, m_1, \ldots, m_k$ – средние значения y во временных сечениях (штриховая линия)

Приближённо количественную характеристику параметрической надёжности $P_{\text{п}}(t_3)$ можно определить по выражению:

$$P_{\text{п}}(t_3) = \int_a^b w(y/t = t_3)\,dy = F(b/t_3) - F(a/t_3), \qquad (3)$$

где $F(a/t_3)$, $F(b/t_3)$ – значения условной (для времени t_3) функции распределения функционального параметра y, подсчитанные для точек $y = a$ и $y = b$.

Выполненные авторами исследования позволили для функциональных параметров биполярных транзисторов предложить в качестве закона описания изменения y во временном сечении t двухпараметрическое распределение Вейбулла вида:

$$w(y/t) = \frac{1}{\mu(t)} \exp\left\{-\frac{1}{\mu(t)}\ y - c(t)\right\}, \quad y \geq c(t), \tag{4}$$

где $\mu(t)$, $c(t)$ – характеристики (параметры) закона распределения для временно́го сечения t.

Распределение (4) является разновидностью экспоненциального распределения и может быть также названо двухпараметрическим экспоненциальным распределением. Актуальность рассмотрения двухпараметрического распределения (4) объясняется тем, что в процессе производства на значение параметров ИЭТ оказывает влияние большое число разнородных факторов. Имеет место также различие в контроле из-за погрешности измерительных приборов, способностей операторов и влияние других факторов, что в совокупности может привести к распределению, близкому к (4). Оправданность выбора этого распределения подтверждается также анализом гистограмм распределения, построенных для функционального параметра y в разных временных сечениях на примере такого функционального параметра как напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$ мощных биполярных транзисторов типа КТ872А.

В выполненной работе двухпараметрическое распределение Вейбулла выбрано за основу получения физико-статистической модели деградации функционального параметра ИЭТ $y(t)$ в любом временно́м сечении.

Величина $\mu(t)$ в выражении (4) представляет собой параметр масштаба, а величина $c(t)$ – параметр сдвига, показывающий смещение $y(t)$ относительно нулевого значения параметра. Эти величины в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации функционального параметра для интересующего времени t. В соответствии с выражением (2) значения $\mu(t)$ и $c(t)$ можно определять как функции времени t и величин $\mu(t = 0)$ и $c(t = 0)$, являющимися параметрами двухпараметрического закона Вейбулла в начальный момент времени ($t = 0$). Однако для инженерных приложений интерес представляет определение значений $\mu(t)$ и $c(t)$ как функций величин $m(y/t = 0)$, $\sigma(y/t = 0)$:

$$\mu(t) = \varphi_1[t, m(y/t = 0), \sigma(y/t = 0)]; \tag{5}$$

$$c(t) = \varphi_2[t, m(y/t = 0), \sigma(y/t = 0)], \tag{6}$$

где φ_1, φ_2 – операторы функциональных зависимостей, подлежащие определению; $m(y/t = 0)$ и $\sigma(y/t = 0)$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение параметра $y(t)$ в начальный момент времени ($t = 0$).

Для получения модели (4) выполнялись предварительные исследования выборки интересующего типа ИЭТ – обучающей выборки. Эти исследования включали физическое моделирование деградации рассматриваемого функционального параметра. Построение модели (4) выполнено по методике, описанной в работе [2].

Для нахождения операторов φ_1, φ_2 выражений (5) и (6) использованы результаты физического моделирования деградации функционального параметра экземпляров обучающей выборки. Вероятность $P_п(t_3)$ определялась по выражению (3) с учётом вида условной функции распределения $F(y/t)$ для двухпараметрического закона Вейбулла.

Авторами показано, что использование двухпараметрического распределения Вейбулла для описания рассеяния параметров ИЭТ во временных сечениях позволяет получить физико-статистические модели деградации, обеспечивающие более эффективное решение задачи прогнозирования параметрической надёжности новых выборок ИЭТ. Эффективность двухпараметрического распределения Вейбулла подтверждена экспериментальными исследованиями на примере мощных биполярных транзисторов типов КТ8272В и КТ8271В. Применительно к функциональному параметру (напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$) установлено, что для моделей деградации, построенных на основе двухпараметрического распределения Вейбулла, ошибки прогнозирования параметрической надёжности в среднем в 2...3 раза меньшие по сравнению со случаем использования моделей, полученных в предположении гипотезы о нормальном законе распределения.

1. Боровиков, С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Боровиков, С.М. Физико-статистические модели деградации функциональных параметров изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 6. – С. 105–109.