

УДК 621.382.019.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

С.М. БОРОВИКОВ, А.В. ШАЛАК, А.И. БЕРЕСНЕВИЧ,
А.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 27 декабря 2007

Решалась задача прогнозирования параметрической надежности изделий электронной техники с помощью математической модели деградации функционального параметра. Предлагается получать модель в виде условной плотности распределения рассматриваемого параметра. Это позволяет применить метод группового прогнозирования.

Ключевые слова: изделия электронной техники, прогнозирование, надежность, функциональный параметр, физико-статистическая модель деградации.

Введение

Постепенные отказы изделий электронной техники (ИЭТ) в технической литературе нередко называют деградационными отказами. Критериями их возникновения являются уровни изменения функциональных параметров, при которых, согласно технической документации, изделие считается вышедшим из строя. Скорость протекания деградационных процессов в нормальных (лабораторных) условиях широкого класса ИЭТ незначительна. Однако в современных электронных устройствах общее количество ИЭТ велико и аддитивное влияние изменений функциональных параметров отдельных элементов вследствие медленной деградации может оказать заметное влияние на поведение выходного параметра электронного устройства в целом. При повышенных электрических, температурных, климатических и прочих нагрузках физико-химические процессы деградации ускоряются, и при этом возрастает количество постепенных отказов.

По мере совершенствования технологии изготовления ИЭТ причины возникновения внезапных отказов могут быть в значительной мере устранены. Постепенные отказы, отражающие свойства, внутренне присущие материалам ИЭТ, в частности старение, исключить невозможно. Однако эти отказы и, следовательно, параметрическую надежность ИЭТ можно прогнозировать [1, 2], что позволит выполнять отбор партий ИЭТ с требуемым уровнем надежности. Этим и вызван растущий интерес к постепенным (деградационным) отказам ИЭТ.

Актуальность разработки

При работе ИЭТ его функциональный параметр (обозначим через y) может рассматриваться как функция времени t . Замечено, что в большинстве случаев параметр y изменяется в нежелательном направлении и в определенный момент времени может достичь предельного уровня, указанного в технической документации или установленного потребителем. Параметрическая надежность характеризует способность ИЭТ сохранять уровень функционального па-

параметра $y(t)$ в пределах норм (от a до b), указанных в технической документации или установленных потребителем, в течение заданного времени t_3 при выбранных режимах и условиях работы. Математическим критерием постепенного отказа в данном случае является нарушение неравенства

$$a \leq y \leq b, \quad (1)$$

а в качестве количественной меры параметрической надежности может использоваться вероятность выполнения этого условия в течение времени t_3 , т.е.

$$P_{\Pi} t_3 = P a \leq y \leq b, t \in 0..t_3 = P a \leq y \leq b, t \in 0..t_3 \quad . \quad (2)$$

Для получения достоверного прогноза о постепенном отказе и, следовательно, параметрической надежности ИЭТ надо располагать количественной моделью надежности в виде зависимости деградации функционального параметра ИЭТ от времени, температуры, электрической нагрузки и других эксплуатационных факторов [3]. Такая модель базируется на изучении поведения ИЭТ не только в момент отказа, но и в ходе изменения функционального параметра ИЭТ, т.е. на исследовании кинетики отказов и может быть получена с помощью вероятностно-статистических методов. Построенную таким способом модель деградации функционального параметра будем называть физико-статистической.

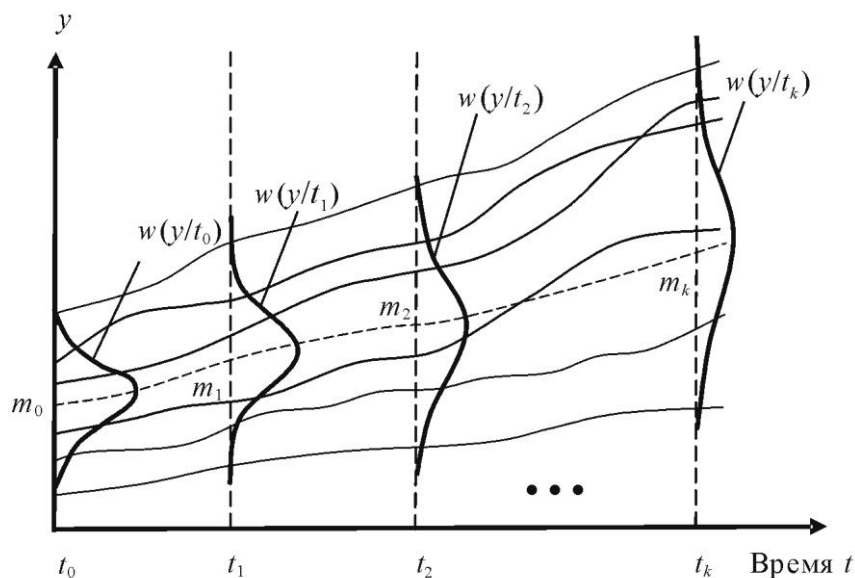


Рис. 1. Изменение плотности распределения функционального параметра y при работе ИЭТ: t_0, t_1, \dots, t_k — моменты времени (временные сечения); m_0, m_1, \dots, m_k — средние значения y во временных сечениях (штриховая линия)

Интерес для практики представляют физико-статистические модели в виде условной плотности распределения параметра $y(t)$. Смысл этих моделей понятен из рисунка 1, на котором величины $w(y/t_i)$ представляют собой плотности распределения параметра $y(t)$ для времени t_i ($i=0, 1, 2, \dots, k$), названные временными сечениями. Имея физико-статистическую модель в виде функции $w(y/t)$, можно решать задачу группового прогнозирования параметрической надежности ИЭТ. Решение задачи сводится к нахождению вероятности того, что для заданного будущего момента времени t_3 функциональный параметр выборки ИЭТ будет отвечать условию (1). Согласно работе [2], вероятность $P(y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, t=t_3)$ может быть найдена по выражению

$$P y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, t = t_3 = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} w(y/t = t_3) dy \quad (3)$$

Записанный интеграл численно представляет собой заштрихованную площадь, ограниченную графиком функции $w(y)$, соответствующей времени $t=t_3$, и ординатами $y=y_{\min}$, $y=y_{\max}$, задаваемыми с учетом технической документации или с позиций потребителя ИЭТ (рис. 2).

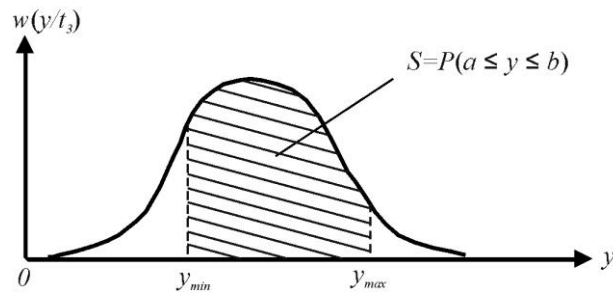


Рис. 2. К определению вероятности нахождения параметра в заданных пределах

Теоретический анализ

Получение физико-статистической модели деградации функционального параметра ИЭТ облегчается с помощью физического эксперимента, заключающегося в моделировании наиболее типичных условий возникновения механизмов отказов и процессов физико-химической деградации функционального параметра. Поясним некоторые математические аспекты физического моделирования деградации функциональных параметров и прогнозирования параметрической надежности ИЭТ на основе этих моделей.

Во многих случаях количественная характеристика параметрической надежности $P_{\Pi}(t_3)$, определяемая выражением (2), может быть получена на основе знания закона распределения функционального параметра $y(t)$ в начальный момент времени, например условной плотности распределения $w(y/t=0)$, а также функции изменения $y(t)$ во времени $y(t)=\varphi(y_0, t)$, где φ — символ функциональной связи; y_0 — значение $y(t)$ в момент времени $t=0$. Значение $P_{\Pi}(t_3)$ является результатом изменения статистического распределения параметра $y(t)$ за время работы t_3 .

В случае монотонности функции $y(t)$ выборка ИЭТ, характеризуемых параметрами $y_i(t)$, в первом приближении сохраняет вид начального распределения в любом временном сечении [4]. Скорость деградационных процессов в ИЭТ при нормальных эксплуатационных условиях невысока, $dy_i/dt \rightarrow 0$ и эффект "переплетания" с течением времени функций $y_i(t)$ малозаметен. В этом случае можно говорить о сохранении в течение длительного времени не только вида закона распределения — условной плотности распределения функционального параметра $w(y/t)$, но и тесной корреляции параметра $y(t)$ для различных временных сечений (рис. 1). Тогда приближенное аналитическое выражение условной плотности распределения $w(y/t)$ для любого интересующего времени t_3 может быть получено путем математических преобразований начального распределения $w(y/t=0)$:

$$w(y/t=t_3) = \psi w(y/t=t_3), t_3, \quad (4)$$

где ψ — символ функциональной зависимости.

Физико-химические характеристики деградации функционального параметра $y(t)$, получаемые усреднением по исследуемой выборке ИЭТ, войдут в виде коэффициентов в правую часть выражения (4). Точный вид условной плотности распределения $w(y/t=t_3)$ в общем случае будет зависеть не только от вида функций $\varphi(y_0, t)$ относительно аргумента y_0 , являющегося источником начального статистического распределения, но и от параметров самой функции $\varphi(y_0, t)$, которые становятся причинами дополнительных разбросов, со временем накладывающих отпечаток на окончательный вид плотности распределения $w(y/t=t_3)$. Нахождение точных аналитических выражений для $w(y/t=t_3)$ сопряжено со значительными математическими трудностями. Поэтому идеализация процесса $y(t)$ и упрощения, допускаемые при определении $w(y/t=t_3)$, оправдывают себя, поскольку дают возможность хотя бы приближенно определить

количественную характеристику параметрической надежности $P_{\Pi}(t_3)$ по принятым в теории вероятностей правилам нахождения вероятности вида $P_{\Pi}(t_3)=P\{a \leq y(t) \leq b, t=t_3\}$, используя закон распределения случайных величин [5]:

$$P_{\Pi}(t_3) = \int_a^b w(y/t=t_3) dy = F(b/t_3) - F(a/t_3), \quad (5)$$

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

Разработка метода получения модели деградации

При налаженном технологическом процессе изготовления ИЭТ наиболее часто наблюдается нормальное распределение параметров изделий. Причинами возникновения разброса параметров являются различные флуктуации технологического процесса, неоднородность применяемых материалов, различие в контроле из-за погрешности измерительных приборов, способностей операторов и другие факторы [3].

Возьмем за основу получения модели деградации нормальный закон распределения функционального параметра y . Условная плотность распределения y для рассматриваемого временного сечения t в этом случае

$$w(y/t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(y/t)} \exp \left\{ -\frac{y-m(y/t)}{2\sigma(y/t)} \right\}^2, \quad (6)$$

где $m(y/t)$, $\sigma(y/t)$ — параметры (характеристики) закона распределения.

Величины $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ представляют собой, соответственно, среднее значение и среднее квадратическое отклонение функционального параметра y во временном сечении t и в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации функционального параметра ИЭТ для интересующего времени t . В соответствии с выражением (4) значения $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$ определяются как функции времени t и величин $m(y/t=0)$ и $\sigma(y/t=0)$, являющихся параметрами нормального закона в начальный момент времени ($t=0$):

$$m(y/t) = \varphi_1 \left[t, m(y/t=0), \sigma(y/t=0) \right]; \quad (7)$$

$$\sigma(y/t) = \varphi_2 \left[t, m(y/t=0), \sigma(y/t=0) \right], \quad (8)$$

где φ_1, φ_2 — операторы функциональных зависимостей, подлежащие определению.

Условная плотность распределения (6), полученная с учетом выражений (7) и (8), может рассматриваться в качестве физико-статистической модели деградации функционального параметра y . Для получения этой модели нужны предварительные исследования выборки интересующего типа ИЭТ. Выборку будем называть обучающей. Ее объем n должен быть не менее 80–100 экземпляров. Процедура построения модели включает следующие основные этапы:

- 1) измерение значения функционального параметра каждого экземпляра обучающей выборки в начальный момент времени ($t=0$);
- 2) получение плотности распределения функционального параметра для времени $t=0$;
- 3) физическое моделирование деградации функционального параметра каждого экземпляра обучающей выборки в течение интересующего времени $t \geq t_3$;
- 4) нахождение операторов φ_1 и φ_2 выражений (7) и (8);
- 5) получение модели деградации в виде условной плотности распределения (6).

Для физического моделирования деградации функционального параметра пригодны ускоренные форсированные испытания ИЭТ, проводимые обычно по типовым методикам. Эти испытания позволяют для каждого экземпляра обучающей выборки получить экспериментальное изменение функционального параметра y в течение интересующего времени t_3 .

Нахождение операторов φ_1 и φ_2 выражений (7) и (8) является наиболее трудоемким этапом. Авторами предлагается метод, описанный ниже. Используя результаты физического моде-

лирования деградации функционального параметра экземпляров обучающей выборки, формируют массив данных в виде табл. 1, в которой приняты следующие обозначения: n_1, n_2, \dots, n_l — номер экземпляра обучающей выборки, отвечающий последнему элементу соответствующей группы; $m_0^{(j)}, \sigma_0^{(j)}$ — среднее значение и среднее квадратическое отклонение функционального параметра для экземпляров j -й группы, $j=1, 2, \dots, l$; t_i — момент времени (временное сечение), для которого контролировались значения функциональных параметров при физическом моделировании их деградации, $i=1, 2, \dots, k$.

В обозначениях $m_0^{(j)}, \sigma_0^{(j)}$ нижний индекс "нуль" подчеркивает то, что эти характеристики относятся к начальному моменту времени ($t=0$).

При решении практических задач число групп l рекомендуется выбирать из условия $l \geq (4-5)$. Количество экземпляров в каждой группе, согласно [2, 5], следует брать не менее 20–30. Число точек контроля (временных сечений) k выбирается с учетом процедуры физического моделирования деградации функциональных параметров экземпляров обучающей выборки и должно отвечать условию $k \geq (4-5)$.

Табл. 1 можно рассматривать в качестве результатов пассивного факторного эксперимента, в котором факторами являются значения $m_0^{(j)}, \sigma_0^{(j)}$ и t_i , откликами — интересующие величины $m(y/t)$ и $\sigma(y/t)$. При соблюдении указанных рекомендаций число опытов эксперимента N составит $N \geq 16-25$ при объеме обучающей выборки $n \geq (80-120)$.

Таблица 1. Массив данных для получения операторов ϕ_1 и ϕ_2 выражений (7) и (8):

| Номер экземпляра обучающей выборки | Номер группы | Характеристика $m(y/t=0)$ | Характеристика $\sigma(y/t=0)$ | Временное сечение t_i |
|------------------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1... n_1 | 1 | $m_0^{(1)}$ | $\sigma_0^{(1)}$ | t_1 |
| (n_1+1) ... n_2 | 2 | $m_0^{(2)}$ | $\sigma_0^{(2)}$ | t_1 |
| ... | ... | ... | ... | t_1 |
| $(n_{l-1}+1)$... n_l | l | $m_0^{(l)}$ | $\sigma_0^{(l)}$ | t_1 |
| 1... n_1 | 1 | $m_0^{(1)}$ | $\sigma_0^{(1)}$ | t_2 |
| (n_1+1) ... n_2 | 2 | $m_0^{(2)}$ | $\sigma_0^{(2)}$ | t_2 |
| ... | ... | ... | ... | t_2 |
| $(n_{l-1}+1)$... n_l | l | $m_0^{(l)}$ | $\sigma_0^{(l)}$ | t_2 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 1... n_1 | 1 | $m_0^{(1)}$ | $\sigma_0^{(1)}$ | t_k |
| (n_1+1) ... n_2 | 2 | $m_0^{(2)}$ | $\sigma_0^{(2)}$ | t_k |
| ... | ... | ... | ... | t_k |
| $(n_{l-1}+1)$... n_l | l | $m_0^{(l)}$ | $\sigma_0^{(l)}$ | t_k |

Групповое прогнозирование параметрической надежности

Полученную физико-статистическую модель деградации функционального параметра в виде условной плотности распределения (6) можно использовать на практике для группового прогнозирования параметрической надежности новых выборок ИЭТ исследуемого типа. При таком прогнозировании прогноз получают в виде вероятности того, что функциональный параметр у выборки ИЭТ в течение заданного времени работы $t=t_3$ не выйдет за пределы норм (a, b), указанных в технической документации или установленных потребителем ИЭТ [2]. Эта вероятность, согласно формуле (5) и гипотезе о нормальном законе распределения функционального параметра у во временных сечениях t_i , может быть определена по выражению

$$P_{\Pi}(t_3) = \Phi \left[\frac{b - m(y/t_3)}{\sigma(y/t_3)} \right] - \Phi \left[\frac{a - m(y/t_3)}{\sigma(y/t_3)} \right], \quad (9)$$

где $\Phi[\dots]$ — табличная нормальная функция распределения [2, 5], найденная для аргумента, указанного в скобках; $m(y/t_3)$ и $\sigma(y/t_3)$ — параметры нормального закона распределения, подсчитанные по выражениям (7) и (8) для времени $t=t_3$.

Оценка достоверности прогнозирования

При решении задач прогнозирования возникает вопрос, в какой степени можно доверять прогнозу, оправдывается ли прогноз. Для ответа на этот вопрос пользуются понятием достоверности прогнозирования. О достоверности прогнозирования параметрической надежности на интервале наработок $(0 \dots t_3)$ предлагается судить с помощью средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$, определяемой по выражению

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}} - [P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}}{[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}} \right)^2} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где k — число моментов времени (временных сечений), для которых контролировались значения функциональных параметров при физическом моделировании их деградации; $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{пр}}$ — прогнозное значение параметрической надежности ИЭТ контрольной выборки, соответствующее временному сечению t_i ; $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$ — экспериментальная оценка вероятности нахождения параметра в заданных пределах (параметрической надежности ИЭТ контрольной выборки), соответствующая временному сечению t_i .

Значения $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$, соответствующие временным сечениям t_i , определяют, используя результаты физического моделирования экземпляров контрольной выборки. Пользуются классическим выражением оценки вероятности по частоте события [5], которое применительно к определению $[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}}$ принимает вид

$$[P_{\Pi}(t_i)]_{\text{э}} = \frac{m(a \leq y \leq b, t = t_i)}{m}, \quad (11)$$

где $m(a \leq y \leq b, t = t_i)$ — количество экземпляров контрольной выборки, для которых функциональный параметр y в момент времени t_i находится в пределах указанных норм от a до b ; m — общее количество экземпляров в контрольной выборке (объем контрольной выборки).

Физико-статистическую модель деградации функционального параметра можно считать пригодной для использования на практике, если средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ не превышает 5–7%.

Экспериментальные исследования

Предложенный метод получения физико-статистической модели деградации функционального параметра и выполнения группового прогнозирования параметрической надежности ИЭТ был апробирован на биполярных транзисторах типа КТ872А. В качестве функциональных параметров рассматривались $h_{21\text{э}}$ — статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером и $U_{\text{КЭнас}}$ — напряжение насыщения коллектор-эмиттер. Электрические режимы измерения параметров соответствовали требованиям технической документации транзисторов. Для проведения физического моделирования деградации указанных параметров было сформировано две выборки: обучающая объемом $n=200$ экземпляров, и контрольная объемом 300 экземпляров. Обучающая выборка использовалась для получения моделей деградации функциональных параметров. Контрольная выборка предназначалась для оценки достоверности группового прогнозирования. Применительно к ней для четырех временных сечений t_i (3840, 8320, 12800 и 17280 ч) решалась задача группового прогнозирования, а на этапе физического моделирования деградации функциональных параметров контролировались их значения в этих временных сечениях. Физическое моделирование деградации состояло в проведении для ИЭТ по типовым методикам [6–8] ускоренных форсированных испытаний, эквивалентных времени 17280 ч с точки зрения функционирования транзисторов в нормальных условиях работы.

При формировании массива данных, аналогичного табл. 1, обучающая выборка разбивалась на пять групп по 40 экземпляров в каждой из них. Выражения вида (7) и (8) строились по данным этой таблицы в виде уравнений множественной линейной регрессии. Для получения уравнений использовалось приложение MS Excel. Вид выражений (7), (8) для параметра $h_{21\text{э}}$:

$$m h_{21Э} / t = 0,9684m_0 + 0,0121\sigma_0 - 0,0092t; \quad (12)$$

$$\sigma h_{21Э} / t = 0,0134m_0 + 0,9083\sigma_0 - 0,0024t, \quad (13)$$

для параметра $U_{КЭнас}$:

$$m U_{КЭнас} / t = 1,1175m_0 + 0,0774\sigma_0 - 0,4118t; \quad (14)$$

$$\sigma U_{КЭнас} / t = -0,0187m_0 + 1,4812\sigma_0 + 0,0704t. \quad (15)$$

Величины $m(h_{21Э}/t)$ и $\sigma(h_{21Э}/t)$, определяемые по выражениям (12) и (13), являются характеристиками физико-статистической модели деградации параметра $h_{21Э}$, а величины $m(U_{КЭнас}/t)$ и $\sigma(U_{КЭнас}/t)$, определяемые по выражениям (14), (15) — характеристиками физико-статистической модели деградации параметра $U_{КЭнас}$.

В табл. 2 приводятся результаты группового прогнозирования параметрической надежности в виде вероятности выполнения условия (1) для транзисторов контрольной выборки. Приняты следующие обозначения: $[P_{П}(t_i)]_{пр}$, $[P_{П}(t_i)]_{э}$ — соответствующее временному сечению t_i прогнозное значение и экспериментальная оценка вероятности нахождения параметра в заданных пределах.

При определении $[P_{П}(t_i)]_{пр}$ условие (1) для параметра $h_{21Э}$ было выбрано в виде $h_{21Э} \geq 18$, а для параметра $U_{КЭнас}$ — в виде $U_{КЭнас} \leq 660$ мВ. Оценки вероятностей вида $[P_{П}(t_3)]_{э}$ подсчитывались по выражению (11).

Таблица 2. Результаты прогнозирования параметрической надежности по параметрам $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ транзисторов контрольной выборки

| Параметр | Вероятность $P_{П}(t_i)$ для времени t_i | | | | | | | |
|-------------|--|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | 3840 ч | | 8320 ч | | 12800 ч | | 17280 ч | |
| | $[P_{П}(t_i)]_{пр}$ | $[P_{П}(t_i)]_{э}$ | $[P_{П}(t_i)]_{пр}$ | $[P_{П}(t_i)]_{э}$ | $[P_{П}(t_i)]_{пр}$ | $[P_{П}(t_i)]_{э}$ | $[P_{П}(t_i)]_{пр}$ | $[P_{П}(t_i)]_{э}$ |
| $h_{21Э}$ | 0,716 | 0,719 | 0,689 | 0,682 | 0,656 | 0,656 | 0,623 | 0,631 |
| $U_{КЭнас}$ | 0,682 | 0,678 | 0,593 | 0,554 | 0,506 | 0,508 | 0,424 | 0,423 |

Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}$ определялась по формуле (10). В случае оценки параметрической надежности ИЭТ по функциональному параметру $h_{21Э}$ эта ошибка составила 0,55%, в случае использования функционального параметра $U_{КЭнас}$ — 1,96%.

Заключение

Предложенный в работе метод позволяет экспериментально с использованием физического моделирования деградации функционального параметра ИЭТ и статистического анализа результатов моделирования получать физико-статистическую модель деградации этого параметра. Ее получают один раз для рассматриваемого типа ИЭТ, исследуя обучающую выборку. С помощью построенной физико-статистической модели деградации можно в начальный момент времени решать задачу группового прогнозирования применительно к другим выборкам. Прогноз дают в виде определения вероятности того, что функциональный параметр рассматриваемой выборки ИЭТ в течение интересующего времени работы t_3 будет находиться в пределах заданных норм.

Получение физико-статистических моделей деградации и их использование для выполнения группового прогнозирования на примере функциональных параметров биполярных транзисторов типа КТ872А показало оправданность принятия гипотезы о нормальном распределении функциональных параметров ИЭТ во временных сечениях, эффективность метода построения физико-статистических моделей деградации функциональных параметров и высокую достоверность прогнозирования (табл. 2).

THE ELECTRONIC TECHNOLOGY DEVICES RELIABILITY FORECASTING BY THE INSTRUMENTALITY OF THE MATHEMATIC MODEL OF FUNCTIONAL PARAMETERS DEGRADATION

S.M. BARAVIKOU, A.V. SHALAK, A.I. BERASNEVICH,
A.V. EMELYANOV, E.N. SHNEIDEROV

Abstract

The problem of forecasting of parametrical reliability of products of electronic techniques by means of mathematical model of degradation of functional parameter was solved. It is offered to receive model in the form of conditional density of distribution of the considered parameter. It has allowed to apply a method of group forecasting.

Литература

1. European Organization of the Quality Control Glossary. Bern: EOQC. 1988.
2. *Боровиков С.М.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Минск, 1998.
3. *Сыновров В.Ф., Пивоваров Р.П., Петров Б.К. и др.* Под ред. *Ю.Г. Миллера.* Физические основы надежности интегральных схем. М., 1976.
4. *Михайлов А.В.* Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. М., 1970.
5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М., 1969.
6. *Peattie D.S., Adams J.D., Carreli S.L. et al.* // Proc. IEEE. 1974. Vol. 62, № 2. P. 149–168.
7. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. Orleans, 1998.
8. Reliability Audit Report 1999. Life Test Data. ON Semiconductor L.L.C., Formerly a Division of Motorola, 1999.