

УДК 621.382.019.3

МЕТОДИКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С.М. БОРОВИКОВ

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

Поступила в редакцию 21 июня 2013

Систематизирован метод имитационных воздействий в применении к индивидуальному прогнозированию постепенных отказов изделий электронной техники. На основе метода разработана методика прогнозирования постепенных отказов биполярных транзисторов. Она позволяет по реакции функционального параметра конкретного экземпляра (транзистора) на имитационное воздействие в начальный момент времени спрогнозировать значение параметра для заданной будущей наработки и принять решение о надежности этого экземпляра по постепенному отказу для этой наработки.

Ключевые слова: изделия электронной техники, биполярные транзисторы, метод имитационных воздействий, индивидуальное прогнозирование значений параметра, прогнозирование постепенных отказов.

Введение

Совершенствование технологии изготовления изделий электронной техники (ИЭТ) приводит к тому, что причины возникновения внезапных отказов могут быть в значительной степени устранены [1–3]. Постепенные отказы, отражающие свойства, внутренне присущие материалам ИЭТ, в частности старение, исключить невозможно. Этим вызван повышенный интерес к постепенным отказам ИЭТ, которые нередко называют деградационными отказами. Известно [4], что постепенные отказы ИЭТ можно прогнозировать. Для прогнозирования значений функциональных параметров ИЭТ (далее параметров) для будущих наработок и, следовательно, постепенных отказов привлекателен, как показано в [2, 5, 6], метод имитационных воздействий. При использовании этого метода решение о возможном постепенном отказе конкретного экземпляра для заданной наработки t_3 принимают по реакции параметра ИЭТ на имитационное воздействие в момент времени $t = 0$.

Актуальность разработки

Применение метода имитационных воздействий для прогнозирования надежности ИЭТ по постепенным отказам включает следующие этапы [2, 5, 6]:

- экспериментальные исследования определенной выборки ИЭТ рассматриваемого типа вначале на воздействие имитационного фактора (здесь изменения параметра ИЭТ носят обратимый характер), а затем на длительную наработку (здесь изменения параметра носят необратимый характер);
- получение имитационной модели, представляющей собой функцию пересчета наработки на значение имитационного фактора;
- определение ошибок прогнозирования;
- индивидуальное прогнозирование значения параметра и, следовательно, надежности по постепенным отказам однотипных экземпляров, не принимавших участие в

экспериментальных исследованиях.

Для научных организаций и работников промышленности, планирующих реализацию процедуры отбора экземпляров, отвечающих требованию надежности по постепенным отказам, важно знать не только четкую последовательность, но и содержание выполняемых действий, которые приведут к достижению цели. Поэтому систематизация метода имитационных воздействий и разработка методики, определяющей порядок (процедуру) решения задачи индивидуального прогнозирования надежности ИЭТ, в том числе биполярных транзисторов (БТ) является актуальной задачей.

Область применения методики и используемые принципы прогнозирования постепенных отказов ИЭТ

Разрабатываемая методика определяет порядок (процедуру) решения задачи индивидуального прогнозирования надежности на заданный будущий момент времени для БТ после этапа их изготовления.

Методика позволяет в начальный момент времени для конкретного экземпляра и заданной наработки t спрогнозировать значение функционального параметра P (далее параметр P) и принять решение о надежности этого экземпляра по постепенному отказу для этой наработки. Соответствие рассматриваемого экземпляра требованию надежности для заданной наработки t определяется сравнением прогнозного значения P с нормой, приводимой в технических условиях (ТУ) на БТ интересующего типа, или со значением, указанным потребителем.

В общем случае при работе транзисторов в усилительном режиме в качестве контролируемого функционального параметра (-ов) P рекомендуется выбирать статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ (коэффициент усиления) и/или обратные токи p - n -переходов, при работе в ключевом режиме – напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$, пробивное напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭОпроб}$ и др.

Индивидуальное прогнозирование применительно к испытываемому экземпляру выполняют методом имитационных воздействий, в основе которого лежит установление и использование статистических связей между изменениями параметров, вызываемыми, с одной стороны, имитационным воздействием, не приводящим к необратимым изменениям параметров БТ, с другой стороны – длительной наработкой (временем работы) БТ.

Для реализации метода имитационных воздействий необходимо для БТ интересующего типа определить закономерности изменения функционального параметра P , вначале от уровня имитационного фактора F , а затем от длительной наработки t [2, 5, 6]. С учетом этих закономерностей получают функцию пересчета (имитационную модель), показывающую, как рассчитать значение имитационного фактора F (обозначим его как $F_{им}$), обеспечивающее такое же изменение прогнозируемого параметра P за интересующую наработку t_3 , что и действие в начальный момент времени имитационного фактора уровня

$$F_{им} \cdot F_{им} = f(t = t_3), \quad (1)$$

где f – символ функциональной связи.

Для нахождения функции пересчета нужны предварительные исследования интересующего типа БТ, называемые обучающим экспериментом [2]. Выборку, используемую для этих целей, будем называть обучающей.

Ошибки прогнозирования определяют, выполняя прогнозирование параметров и, следовательно, постепенных отказов другой выборки БТ рассматриваемого типа. Эту выборку будем называть контрольной. Для экземпляров этой выборки необходимо получить не только прогнозные значения параметра для заданной наработки, но и установить их истинные значения для этой наработки. Определение ошибок прогнозирования выполняют с целью проверки пригодности полученной функции пересчета для прогнозирования значений параметра P и постепенных отказов тех экземпляров рассматриваемого типа БТ, которые не принимали участие в экспериментальных исследованиях (в обучающей и контрольной выборках).

Индивидуальное прогнозирование параметра P конкретного, будем называть прогнозируемого экземпляра, не принимавшего участия в экспериментальных исследованиях, позволяет сделать оценку его надежности по постепенному отказу для заданной наработки t . Для этого, пользуясь полученной функцией пересчета (1), для наработки t_3 определяют значение имитационного фактора $F_{им}$. Для прогнозируемого экземпляра обеспечивают уровень имитационного фактора, равный значению $F_{им}$, и измеряют параметр P при этом значении имитационного фактора. Считают, что для наработки t_3 параметр P прогнозируемого экземпляра будет иметь такое же значение, как полученное при измерении в условиях наличия имитационного воздействия, равного рассчитанному уровню $F_{им}$. С учетом этого получают прогнозное значение параметра.

Путем сравнения измеренного значения P с нормой делают заключение о надежности прогнозируемого экземпляра по постепенному отказу для заданной наработки t_3 .

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования являются важнейшей составной частью разрабатываемой методики. Цель этих исследований состоит в определении закономерности изменения функционального параметра P от уровня имитационного фактора F и от длительной наработки t [2, 5, 6]. С учетом этих закономерностей далее получают имитационную модель (функцию пересчета).

Для проведения экспериментальных исследований формируется выборка БТ рассматриваемого типа. Ее общий объем N включает обучающую выборку размером n и контрольную размером m . Выборку объемом N , включающую обучающую и контрольную выборку, будем называть объединенной. Результаты испытаний обучающей выборки используют для получения функции пересчета, результаты испытаний контрольной выборки – для определения ошибок прогнозирования. Экспериментальные исследования обеих выборок экономически целесообразно проводить одновременно. Отбор N экземпляров объединенной выборки должен выполняться случайным образом из одной и той же партии БТ.

Последовательность экспериментальных исследований. Вначале проводят эксперимент с использованием имитационного воздействия. В качестве имитационного фактора F применительно к БТ рекомендуется выбирать ток коллектора I_K или температуру T . Дальнейшие действия описываются применительно к случаю использования I_K в качестве F .

При различных значениях тока I_K (примерно в 5–7 точках) у каждого экземпляра объединенной выборки объемом N , включающей обучающую и контрольную выборки, измеряют интересующий параметр P (столбцы 2–5 табл. 1).

Таблица 1. Форма записи данных о зависимости параметра P i -го экземпляра объединенной выборки от тока коллектора I_K и наработки t

Номер экземпляра объединенной выборки	Параметр P при значении тока I_K , А				Параметр P для заданной наработки t , ч			
	I_{K1}	I_{K2}	...	I_{Kl}	t_1	t_2	...	t_n
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$P_1(I_{K1})$	$P_1(I_{K2})$	...	$P_1(I_{Kl})$	$P_1(t_1)$	$P_1(t_2)$	...	$P_1(t_n)$
2	$P_2(I_{K1})$	$P_2(I_{K2})$	...	$P_2(I_{Kl})$	$P_2(t_1)$	$P_2(t_2)$	...	$P_2(t_n)$
...
N	$P_N(I_{K1})$	$P_N(I_{K2})$	...	$P_N(I_{Kl})$	$P_N(t_1)$	$P_N(t_2)$	...	$P_N(t_n)$

В табл. 1 число точек имитационного фактора обозначено символом l ($l \approx 5-7$).

Используя данные табл. 1 и прикладные программы для ЭВМ, для каждого экземпляра контрольной выборки получают математическую модель вида

$$P_i = \varphi(I_K); i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где φ – символ функциональной связи, вид которой определяется программой для ЭВМ.

Для каждой точки I_K экземпляров обучающей выборки объемом n находят среднее значение P . Полученные данные рекомендуется свести в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость среднего значения параметра P экземпляров обучающей выборки от имитационного тока коллектора I_K

Значение I_K , А	Среднее значение параметра P экземпляров обучающей выборки
I_{K1}	$P(I_{K1})$
I_{K2}	$P(I_{K2})$
.....
I_{Kl}	$P(I_{Kl})$

Используя данные табл. 2 и прикладные программы для ЭВМ, получают математическую модель зависимости среднего значения параметра P от тока коллектора I_K :
 $P = f_1(I_K)$, (3)
 где f_1 – символ функциональной связи, вид которой определяется программой для ЭВМ.

Проводят испытания объединенной выборки объемом N на длительную наработку. В процессе испытаний в нескольких точках наработки (t_1, t_2, \dots, t_n) контролируют параметр P . Рекомендуется использовать ускоренные испытания, позволяющие за относительно короткое время $t_{\text{уск}}$ получить о параметре P ту же информацию, что и за длительную наработку t_n в обычных условиях.

Вначале планируют проведение ускоренных чисто высокотемпературных испытаний. В случае, если действие только повышенной температуры окажется недостаточным для существенного уменьшения общей продолжительности испытаний, то дополнительно следует использовать электрическую нагрузку. При планировании ускоренных испытаний на длительную наработку можно воспользоваться работами [7–9].

Результаты ускоренных испытаний рекомендуется свести в табл. 1 (столбцы 6–9).

Далее оценивают влияние наработки t на среднее значение параметра P экземпляров обучающей выборки. Для этого, используя результаты испытаний обучающей выборки объемом n , для точек наработки (t_1, t_2, \dots, t_n) определяют среднее значение P и информацию заносят в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость среднего значения P экземпляров обучающей выборки от наработки t

Значение t , час	Среднее значение параметра P экземпляров обучающей выборки
t_1	$P(t_1)$
t_2	$P(t_2)$
.....
t_n	$P(t_n)$

Используя данные табл. 3 и прикладные программы для ЭВМ, получают математическую модель вида
 $P = f_2(t)$, (4)

где f_2 – символ функциональной зависимости, конкретный вид которой выбирается с помощью прикладной программы для ЭВМ.

Получение функции пересчета и определение ее качества

Для нахождения функции пересчета наработки на значение имитационного тока коллектора необходимо приравнять математические выражения (3) и (4), а затем решить полученное уравнение относительно тока коллектора I_K . В итоге будет найдена функция для расчета имитационных значений тока коллектора $I_{\text{Ким}}$ в зависимости от задаваемой наработки:

$$I_{\text{Ким}} = f(t), \quad (5)$$

где f – символ функциональной связи, вид которой определяется прикладной программой для ЭВМ.

Значение имитационного тока коллектора $I_{\text{Ким}}$, которое гипотетически вызывает такое же изменение параметра P , как и заданная наработка t , определяют по выражению (5).

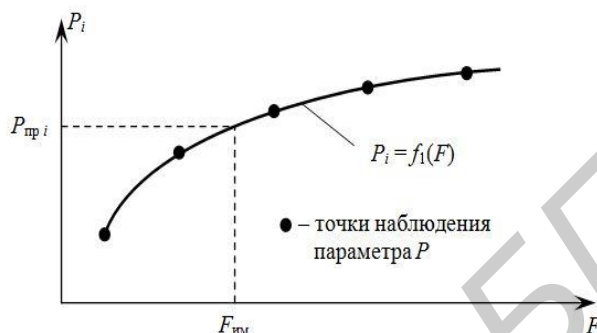
О качестве полученной функции пересчета (5) будем судить по средней ошибке прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$. Ее определяют для значения наработки t , для которого интересуются

надежностью по постепенным отказам БТ исследуемого типа. Рекомендуемая последовательность определения средней ошибки прогнозирования следующая.

1. Уточняют значение заданной наработки t , для которой интересуются постепенными отказами БТ рассматриваемого типа.

2. По найденной функции пересчета (5) рассчитывают значение имитационного тока коллектора $I_{\text{Ким}}$ для заданной наработки t .

3. Определяют прогнозное значение P i -го экземпляра контрольной выборки $P_{\text{пр } i}$ ($i = 1, 2, \dots, m$), соответствующее заданной наработке t . Скорее всего, его придется определять по полученным моделям (2) или построенным графикам (см. рисунок) с помощью интерполяции, принимая во внимание значения P , соответствующие точкам тока $I_{\text{К}}$, между которыми окажется имитационное значение $I_{\text{Ким}}$, рассчитанное по функции пересчета (5) для заданной наработки.



Определение прогнозного значения параметра P i -го экземпляра контрольной выборки с использованием расчетного значения $I_{\text{Ким}}$

4. Используя информацию табл.1 (столбцы 6–9) находят истинное значение P i -го экземпляра контрольной выборки $P_{\text{ист } i}$ ($i = 1, 2, \dots, m$), соответствующее заданной наработке t . Если ошибку прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ определяют для наработки t , для которой во время испытаний на длительную наработку не проводился контроль параметра P , то значение $P_{\text{ист } i}(t)$ должно быть получено интерполяцией данных табл. 1 (столбцы 6–9), используя соседние значения $P_{\text{ист } i}(t_q)$ и $P_{\text{ист } i}(t_{q+1})$, находящиеся соответственно слева и справа от точки $P_{\text{ист } i}(t)$, $t_q < t < t_{q+1}$. Допустимо, при этом, использование линейной интерполяции.

Данные, полученные в пп. 3 и 4, рекомендуется свести в табл. 4.

Среднюю ошибку прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ для заданной наработки t будем рассчитывать по формуле [10]:

$$\Delta_{\text{ср}}(t) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{\text{пр } i} - P_{\text{ист } i}}{P_{\text{ист } i}} \right)^2}, \quad (6)$$

где m — объем контрольной выборки; $P_{\text{пр } i}$ — прогнозное значение параметра P , соответствующее i -му экземпляру контрольной выборки для заданной наработки t , найденное в п. 3; $P_{\text{ист } i}$ — истинное значение параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для заданной наработки t , полученное в п. 4, его получают с использованием результатов испытаний контрольной выборки на длительную наработку.

Таблица 4. Значения $P_{\text{пр } i}$ и $P_{\text{ист } i}$, соответствующие заданной наработке t для экземпляров контрольной выборки

Номер экземпляра контрольной выборки	Прогнозное значение параметра $P_{\text{пр } i}$	Истинное значение параметра $P_{\text{ист } i}$
1	$P_{\text{пр } 1}$	$P_{\text{ист } 1}$
2	$P_{\text{пр } 2}$	$P_{\text{ист } 2}$
.....
m	$P_{\text{пр } m}$	$P_{\text{ист } m}$

Функцией пересчета (5) рекомендуется пользоваться на практике, если ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}(t) \leq 5...7\%$.

Индивидуальное прогнозирование новых экземпляров

Новыми будем называть однотипные экземпляры, которые не являлись представителями обучающей и контрольной выборок. Опишем последовательность прогнозирования.

1. Используя функцию пересчета (5), для заданной наработки t_3 рассчитывается имитационное значение тока коллектора $I_{\text{Ким}}(t_3)$.

2. У прогнозируемого экземпляра (транзистора), надежность по постепенному отказу которого прогнозируется, измеряют параметр P при токе коллектора, равном значению $I_{\text{Ким}}(t_3)$. Считается, что прогнозируемый экземпляр на момент окончания наработки t_3 будет иметь такое же значение параметра P , как и полученное в результате измерения при токе коллектора, равном рассчитанному уровню $I_{\text{Ким}}(t_3)$. Результат измерения является прогнозом значения параметра P для заданной наработки t_3 .

3. Сравнивая значение параметра P , полученное при измерении, со значением, приводимым в ТУ на БТ рассматриваемого типа или с нормой, установленной потребителем, принимают решение (получают прогноз) о надежности по постепенному отказу прогнозируемого экземпляра для заданной наработки t_3 .

4. Если значение $I_{\text{Ким}}(t_3)$, рассчитанное по функции пересчета (5), превышает предельно допустимое значение, указываемое в ТУ, более чем в 2 раза, то для заданной наработки t_3 следует отказаться от прогнозирования значения параметра P , ибо существует заметный риск повреждения прогнозируемого экземпляра при таком токе коллектора.

Пример получения функции пересчета

Ниже приводится пример прогнозирования надежности БТ по постепенному отказу в предположении, что выполнены экспериментальные исследования. Этот пример будет включен в методику в качестве иллюстрации выполнения некоторых операций, входящих в процедуру прогнозирования.

В качестве параметра P , определяющего надежность по постепенному отказу БТ типа КТ872А в электрической схеме электронного устройства, использовалось напряжение насыщения $U_{\text{КЭнас}}$ при рабочем токе коллектора $I_{\text{К}} = 7$ А при токе базы $I_{\text{Б}} = 3,5$ А.

Будем считать, что путем обработки результатов экспериментальных исследований обучающей выборки для параметра $U_{\text{КЭнас}}$ была получена следующая аналитическая зависимость от тока коллектора $I_{\text{К}}$ как имитационного фактора при значении $I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = 2$ [2]:

$$U_{\text{КЭнас}} = 75 \exp(0,309 I_{\text{К}}). \quad (7)$$

Выполнив испытания экземпляров обучающей выборки на длительную наработку, получена зависимость $U_{\text{КЭнас}}$ от наработки t в диапазоне $0 \dots t_{\text{н}}$ для рабочего тока коллектора, равного $I_{\text{К}} = 7$ А при значении $I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = 2$ ($t_{\text{н}}$ – наработка транзисторов, указанная в ТУ):

$$U_{\text{КЭнас}} = 2,4t^{0,47} + 615. \quad (8)$$

Размерность параметров, входящих в выражения (7) и (8): $[I_{\text{К}}]$ – амперы; $[U_{\text{КЭнас}}]$ – милливольты; $[t]$ – часы.

Функция пересчета значения наработки t на имитационный ток $I_{\text{Ким}}$, полученная с использованием моделей (7) и (8), примет вид

$$I_{\text{Ким}} = 3,246 \ln(0,032t^{0,47} + 8,2), \text{ А.} \quad (9)$$

По уравнению (9) можно определить: например, для $t_3 = 20000$ ч имитационный ток $I_{\text{Ким}}(t_3) = 7,95$ А.

Индивидуальное прогнозирование надежности БТ по постепенному отказу для новых однотипных экземпляров для наработки $t_3 = 20000$ ч состоит в измерении параметра $U_{\text{КЭнас}}$ при этом токе коллектора и значении $I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = 2$ и сравнении полученного результата с нормой. Предположим, что результат измерения составил 1068 мВ. Сравнивая это значение с нормой, приводимой в ТУ на БТ типа КТ872А (не более 1 В = 1000 мВ), делаем вывод о несоответствии

этого экземпляра требованию надежности по постепенному отказу по параметру $U_{КЭнас}$ для наработки $t_3 = 20000$ ч.

Заключение

Рассмотренные положения прогнозирования параметров ИЭТ методом имитационных воздействий положены в основу разработки методики прогнозирования постепенных отказов биполярных транзисторов. Методика позволяет по реакции функционального параметра конкретного экземпляра на имитационное воздействие в начальный момент времени спрогнозировать значение параметра для заданной будущей наработки и принять решение о надежности этого экземпляра по постепенному отказу для этой наработки.

FORECASTING METHOD OF INDIVIDUAL PHASING OF ELECTRONIC PRODUCTS BY SIMULATION IMPACTS

S.M. BARAVIKOU

Abstract

The systematization of the method of simulation effects applied to individual forecasting gradual failures of electronic equipment is carried out. The method used to develop a method for predicting gradual failures of bipolar transistors. It allows the reaction of the functional parameter specific instance (transistor) on the impact of simulation at the initial time to predict the value for a given future developments and decide on the reliability of this instance of the phase-out of use for this.

Список литературы

1. Сынаров В.Ф., Пивоварова Р.П., Петров Б.К. и др. Физические основы надежности интегральных схем. М., 1976.
2. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Шнейдеров Е.Н. и др. Прогнозирование надежности изделий электронной техники. Минск, 2010.
3. Боровиков С.М., Шалак А.В., Бересневич А.И. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 105–109.
4. European Organization of the Quality Control Glassary. Bern, 1988.
5. Боровиков С.М., Щерба А. И. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2004. № 4. С. 37–40.
6. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Докл. БГУИР. 2003. Т.1, № 2. С. 113–117.
7. Manual. Quality and Reliability. Philosophy and Procedures. AN-RQC-REP013V20 / NEC Electronics (Europe) GmbH, 1993.
8. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. Orleans, 1998.
9. Bipolar Power Transistors Data Book 1998 / TEMIC Semiconductor GmbH. DGT-005-1297, 1997.
10. Боровиков С.М., Бересневич А.И., Шалак А.В. // Докл. БГУИР. 2006. № 3 (15). С. 12–17.