

УДК 621.382.019.3

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С.М. БОРОВИКОВ, А.И. БЕРЕСНЕВИЧ, А.В. ШАЛАК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 20 марта 2006*

Прогнозирование функциональных параметров полупроводниковых приборов методом имитационных воздействий выполняется с использованием имитационной модели в виде функции пересчета. Для приборов рассматриваемого вида эту функцию получают один раз на этапе их предварительных исследований (по результатам обучающего эксперимента). С ее помощью определяют уровень имитационного фактора, соответствующий заданной будущей наработке. Решение о пригодности функции пересчета принимают по достоверности прогноза функциональных параметров. Предлагается оценивать достоверность по значению средней ошибки прогнозирования, используя изделия контрольной выборки. Разработан метод определения этой ошибки. Применение метода иллюстрируется примером.

Ключевые слова: изделия электронной техники, полупроводниковые приборы, биполярные транзисторы, метод имитационных воздействий, прогнозирование функциональных параметров, ошибка прогнозирования.

Введение

Для прогнозирования функциональных параметров изделий электронной техники (ИЭТ), в частности полупроводниковых приборов, перспективным является метод имитационных воздействий. В его основу положен принцип статистической аналогии между изменениями параметра, вызываемыми длительным функционированием ИЭТ, с одной стороны, и изменениями, обусловленными кратковременным воздействием в начальный момент времени ($t=0$) определенного фактора, имитирующего изменение параметра и не вызывающего уменьшение рабочего ресурса изделия — с другой [1, 2].

Для реализации метода на этапе обучающего эксперимента для ИЭТ рассматриваемого типа определяют закономерности изменения функционального параметра (обобщенно P) от уровня имитационного фактора и от длительной наработки. С учетом этого получают имитационную модель в виде функции пересчета, позволяющей рассчитывать значение имитационного фактора в зависимости от заданной наработки ИЭТ. Решение о прогнозном значении функционального параметра конкретного экземпляра (изделия) принимают по результатам простого эксперимента — измерения в момент времени $t=0$ значения этого параметра при имитационном воздействии, уровень которого был рассчитан по имитационной модели для интересующей наработки. Результат измерения рассматривается в качестве прогноза функционального параметра. При реализации метода имитационных воздействий возникает вопрос, какова достоверность прогноза и можно ли им пользоваться на практике.

Теоретический анализ

Достоверность прогнозирования функционального параметра методом имитационных воздействий определяется удачностью выбора имитационного фактора, о чем можно судить по имитационной модели в виде функции пересчета, получаемой с использованием результатов обучающего эксперимента. Вопросы достоверности прогнозирования функциональных параметров полупроводниковых приборов обсуждались в работах [3, 4]. Из них следует, что о достоверности можно судить по значению средней ошибки прогнозирования ($\Delta_{\text{ср}}$), определяемой по контрольной выборке. Контрольная выборка — это выборка приборов, которая используется сугубо для оценки ошибки $\Delta_{\text{ср}}$. Для определения $\Delta_{\text{ср}}$, соответствующей наработке t , предлагается формула

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

где m — объем контрольной выборки; $P_{\text{пр } i}$ — прогнозное значение параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для заданной наработки t ; $P_{\text{ист } i}$ — истинное значение параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для наработки t (это значение получают в процессе испытаний полупроводниковых приборов на длительную наработку — долговечность).

Если средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}} \leq 10\%$, то достоверность прогнозирования считают приемлемой для практики [3].

Отметим, что исследования экземпляров контрольной выборки целесообразно проводить одновременно с исследованием обучающей выборки с целью экономии времени и средств. Для чего случайным образом формируется выборка полупроводниковых приборов рассматриваемого типа. Ее общий объем (N) включает обучающую (n) и контрольную (m) выборки. Результаты испытаний первой выборки используют для получения функции пересчета, второй — для определения возможных ошибок прогнозирования.

Поясним, как использовать экспериментальные исследования контрольной выборки для определения ошибок прогнозирования. Вначале проводят эксперимент с использованием имитационного воздействия. При различных значениях имитационного фактора F (примерно в 5–7 точках) у каждого экземпляра контрольной выборки измеряют интересующий параметр P . Полученные данные рекомендуется представлять в виде табл. 1.

Таблица 1. Данные о зависимости параметра P от имитационного фактора F

Номер экземпляра контрольной выборки	Значение параметра P при имитационном факторе F , равном:			
	F_1	F_2	...	F_l
1	$P_1(F_1)$	$P_1(F_2)$	...	$P_1(F_l)$
2	$P_2(F_1)$	$P_2(F_2)$	...	$P_2(F_l)$
...
m	$P_m(F_1)$	$P_m(F_2)$	...	$P_m(F_l)$

В табл. 1 число точек имитационного фактора F обозначено символом l .

Используя данные таблицы 1 и прикладные программы для ПЭВМ, для каждого i -го экземпляра контрольной выборки получают математическую модель вида

$$P_i = f_i(F); \quad i=1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где f_i — символ функциональной связи, вид которой определяется используемой прикладной программой.

Затем проводят испытания обучающей и контрольной выборок (общий объем $N=n+m$) на длительную наработку. Используя результаты испытаний экземпляров контрольной выборки, определяют влияние наработки t на параметр P каждого экземпляра этой выборки (табл. 2).

Таблица 2. Данные о зависимости параметра P от наработки t

Номер экземпляра контрольной выборки	Значение параметра P при наработке t , равной:			
	t_1	t_2	...	t_k
1	$P_1(t_1)$	$P_1(t_2)$	...	$P_1(t_k)$
2	$P_2(t_1)$	$P_2(t_2)$	...	$P_2(t_k)$
...
m	$P_m(t_1)$	$P_m(t_2)$	...	$P_m(t_k)$

В табл. 2 число точек наработки t , в которых контролировался параметр P , обозначено символом k .

Далее, используя данные табл. 2, с помощью прикладных программ для ПЭВМ для каждого i -го экземпляра контрольной выборки получают математическую модель вида

$$P_i = f_2(t); i=1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где f_2 — символ функциональной зависимости, конкретный вид которой выбирается с помощью прикладной программы.

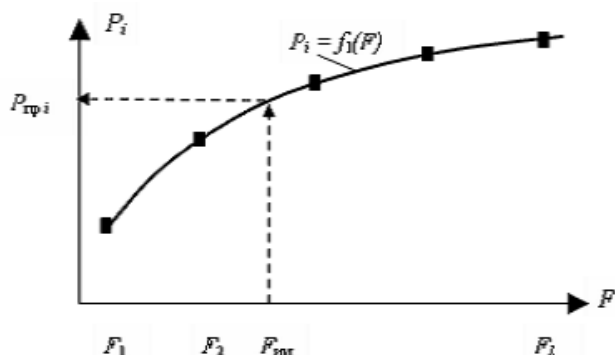


Рис. 1. Определение прогнозного значения параметра P i -го экземпляра с использованием расчетного значения $F_{им}$ имитационного фактора: ■ — точки наблюдения параметра P

Если среднюю ошибку прогнозирования $\Delta_{ср}$ определяют для наработки t , при которой не проводился контроль параметра P при испытании на длительную наработку, то значение $P_{ист i}$ должно быть получено интерполяцией с использованием функции вида (3).

Ниже показано, как определять ошибки прогнозирования параметров полупроводниковых приборов и, следовательно, принимать решение о пригодности полученной функции пересчета (имитационной модели) для практического использования.

Экспериментальные исследования

Полупроводниковыми приборами, на примере которых иллюстрировался метод определения ошибок прогнозирования, были выбраны мощные биполярные транзисторы типа КТ872А. В качестве функционального параметра, значения которого прогнозировались с целью принятия решения о постепенном отказе транзисторов, рассматривалось напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($U_{КЭнас}$) при токе коллектора $I_K=7$ А и отношении I_K к току базы I_B , равном $I_K/I_B=2$. В роли имитационного фактора использовался ток коллектора I_K . Исследуемая выборка транзисторов включала 200 экземпляров, 100 из которых, выбранные случайным образом, рассматривались как обучающая выборка, а другие 100 — как контрольная.

Эксперимент состоял в следующем. У каждого экземпляра как обучающей, так и контрольной выборок в момент времени $t=0$ снималась зависимость параметра $U_{КЭнас}$ от тока коллектора в диапазоне от 0,01 до 8 А. Затем вся выборка транзисторов испытывалась на длительную наработку (долговечность). Использовались ускоренные форсированные испытания, выполняемые по типовым методикам. Время ускоренных испытаний составляло 216 ч, что экви-

валентно наработке 15000 ч в нормальных условиях работы [5–7]. После этого с использованием экземпляров обучающей выборки строились математические модели видов

$$P = \varphi_1(I_K), \quad (4)$$

$$P = \varphi_2(t), \quad (5)$$

где φ_1, φ_2 — символы математических зависимостей, вид которых выбирался с помощью прикладных программ для ПЭВМ, исходя из условия лучшего описания среднего значения параметра P экземпляров обучающей выборки соответственно от тока коллектора I_K как имитационного фактора и от наработки t .

Далее, принимая во внимание выражения (4) и (5), приемами, описанными в [1], находилась имитационная модель в виде функции пересчета заданной наработки t на значение имитационного фактора – имитационное значение тока коллектора $I_{\text{Ким}}$:

$$I_{\text{Ким}} = \varphi(t), \quad (6)$$

где φ — символ функциональной связи, конкретный вид которой зависит от моделей (4) и (5).

После этого определялась средняя ошибка прогнозирования для шести наработок в диапазоне 3330...16950 ч.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведен график зависимости параметра $U_{\text{КЭнас}}$ от тока коллектора I_K , полученный усреднением значений $U_{\text{КЭнас}}$ по всем экземплярам обучающей выборки.

На рис. 3 приведен график зависимости параметра $U_{\text{КЭнас}}$ от времени ускоренных испытаний t_y . Этот график также построен с использованием экземпляров обучающей выборки.

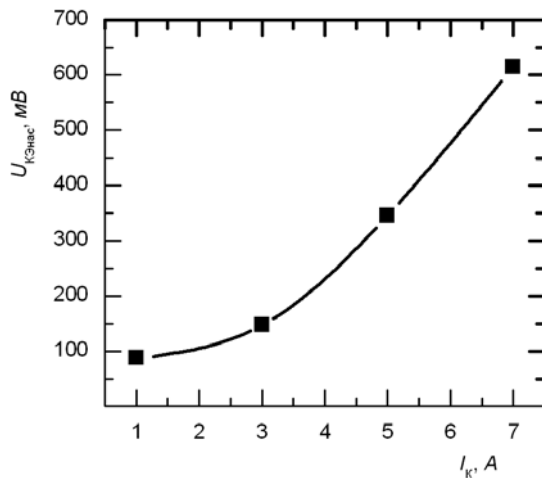


Рис. 2. Зависимость среднего значения $U_{\text{КЭнас}}$ от тока коллектора при $I_K/I_B=2$

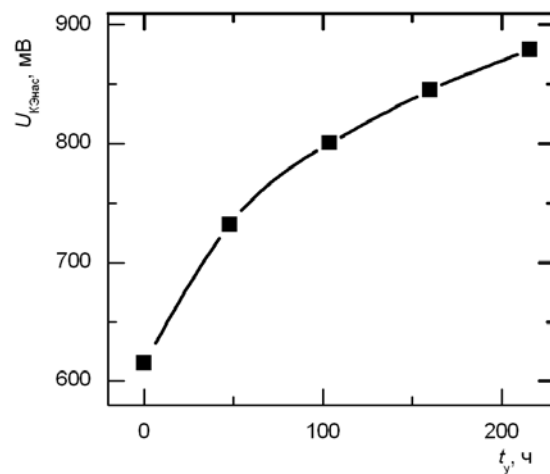


Рис. 3. Изменение среднего значения $U_{\text{КЭнас}}$ от времени ускоренных испытаний t_y при $I_K=7 \text{ А}$ и $I_K/I_B=2$

Для параметра $U_{\text{КЭнас}}$ были получены следующие аналитические зависимости от тока коллектора I_K и от наработки t (математические модели) [4]:

$$U_{\text{КЭнас}} = 75 \cdot \exp(0,309 \cdot I_K), \quad (7)$$

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

Функция пересчета наработки t транзистора на значение имитационного тока $I_{\text{Ким}}$, найденная с использованием моделей (7) и (8), приняла вид

$$I_{\text{К.им}} = 3,24 \cdot \ln(0,032 \cdot t^{0,47} + 8,2). \quad (9)$$

Размерность параметров выражений (7), (8) и (9): $[U_{\text{КЭнас}}] = \text{мВ}$; $[I_{\text{К}}, I_{\text{Ким}}] = \text{А}$; $[t] = \text{ч}$.

По выражению (9) можно определить, что для наработки $t = 15000$ ч имитационный ток коллектора $I_{\text{Ким}} = 7,81$ А. Прогнозирование функционального параметра $U_{\text{КЭнас}}$ применительно к новым экземплярам (экземплярам, не принимавшим участие в эксперименте) транзисторов типа КТ872А для наработки $t = 15000$ ч состоит в измерении $U_{\text{КЭнас}}$ при этом токе коллектора. Результат измерения рассматривается в качестве прогнозного значения $U_{\text{КЭнас}}$.

Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ подсчитывалась по формуле (1) для шести значений наработок t , указанных в табл. 3.

Таблица 3. Средняя ошибка прогнозирования параметра $U_{\text{КЭнас}}$ при $I_{\text{К}} = 7 \text{ А}$ и $I_{\text{К}}/I_{\text{Б}} = 2$

t , ч	3330	7220	11100	13050	15000	16950
$\Delta_{\text{ср}}$, %	8,3	7,9	9,1	8,8	9,7	9,5

Для расчета средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ параметра $U_{\text{КЭнас}}$ использовались только экземпляры контрольной выборки.

Для нахождения прогнозного значения $U_{\text{КЭнас}}$ i -го экземпляра контрольной выборки вначале для этого экземпляра строилась математическая модель вида (2): $U_{\text{КЭнас}} = \varphi_1(I_{\text{К}})$. Далее, используя построенную функцию пересчета (9), для наработок t , указанных в табл. 3, рассчитывались имитационные значения тока коллектора $I_{\text{Ким}}$. Прогнозное значение $U_{\text{КЭнас}}$ i -го экземпляра для конкретной наработки t находилось методом интерполяции. При этом принимались во внимание значения $U_{\text{КЭнас}}$, соответствующие экспериментальным точкам имитационного фактора, между которыми оказалось имитационное значение тока коллектора $I_{\text{Ким}}$, рассчитанное для интересующей наработки t (см. рис. 1), а также вид математической модели $U_{\text{КЭнас}} = \varphi_1(I_{\text{К}})$, полученной для i -го экземпляра.

Истинные значения параметра $U_{\text{КЭнас}}$ i -го экземпляра контрольной выборки для наработок t (см. табл. 3) определялись путем измерения $U_{\text{КЭнас}}$ в процессе проведения испытаний транзисторов на длительную наработку. Результаты расчета средней ошибки прогнозирования сведены в табл. 3.

По аналогии с параметром $U_{\text{КЭнас}}$ приемами, описанными выше, были построены математические модели вида (4), (5) и получена функция пересчета вида (6) для статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером (параметра $h_{21Э}$) при напряжении коллектор–эмиттер $U_{\text{КЭ}} = 5 \text{ В}$ и $I_{\text{К}} = 0,1 \text{ А}$ [10]:

$$I_{\text{Ким}} = 1,545 \cdot 10^{-5} t + 0,273. \quad (10)$$

В выражение (10) наработка t должна подставляться в часах, в этом случае имитационное значение тока коллектора $I_{\text{Ким}}$ получается в амперах.

Так же, как и для $U_{\text{КЭнас}}$, определена средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ параметра $h_{21Э}$ для шести наработок t (табл. 4).

Таблица 4. Средняя ошибка прогнозирования параметра $h_{21Э}$ при $U_{\text{КЭ}} = 5 \text{ В}$ и $I_{\text{К}} = 0,1 \text{ А}$

t , ч	3330	7220	11100	13050	15000	16950
$\Delta_{\text{ср}}$, %	3,7	7,7	5,4	6,5	4,7	7,6

Из табл. 3 и 4 видно, что функции пересчета (имитационные модели) вида (9) и (10) являются пригодными для выполнения прогнозирования соответственно параметров $U_{\text{КЭнас}}$ и $h_{21Э}$, так как они удовлетворяет условию $\Delta_{\text{ср}} \leq 10\%$ на всем интервале рассмотренных наработок от 3330 до 16950 ч. Поэтому в этих случаях можно говорить о приемлемой для практики достоверности прогнозирования функциональных параметров $U_{\text{КЭнас}}$ и $h_{21Э}$ биполярных транзисторов исследованного типа (КТ872А).

Заклучение

Приведенные в работе результаты проиллюстрировали процедуру определения ошибок прогнозирования и показали эффективность прогнозирования функциональных параметров биполярных транзисторов методом имитационных воздействий с использованием тока коллектора в качестве имитационного фактора. Метод позволяет в момент времени $t = 0$ получать точечный прогноз функциональных параметров с достоверностью, приемлемой для практики, применительно к новым экземплярам (экземплярам, не являющимися представителями обучающей и контрольной выборок). Для этого достаточно измерить интересующий функциональный параметр при значении тока коллектора, рассчитанном по функции пересчета (имитационной модели) в зависимости от заданной наработки транзистора.

AUTHENTICITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES' FUNCTIONAL PARAMETERS FORECAST BY IMITATION EFFECT METHOD

S.M. BARAVIKOU, A.I. BERASNEVICH, A.V. SHALAK

Abstract

The forecast of semiconductor devices' functional parameters by imitation effect is performed with the use of imitation model in the form of scaling function. This function is obtained at the stage of preliminary investigations of the articles (by the results of the teaching experiment) and is used for estimating the level of imitation factor corresponding to the specified future time to first failure. The decision on the fitness of scaling function is taken by the authenticity of functional parameters forecast. We suggest evaluating the authenticity by the value of the average forecast error using the articles of control selection. The method of determination of the error has been worked out. The application of the method is illustrated by an example.

Литература

1. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С. 113–117.
2. Боровиков С.М., Берасневич А.И. // Докл. БГУИР. 2005. Т. 1, № 2. С. 113–117.
3. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Изв. Белор. инж. акад. 2001. № 1 (11)/3. С. 235–238.
4. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Изв. Белор. инж. акад. 2003. № 1 (15)/4. С. 118–120.
5. Боровиков С.М., Щерба А.И., Стасюк Д.М., Зорин Д.В. // Изв. Белорус. инж. акад. 1999. № 1 (7)/2. С. 80–82.
6. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Веснік сувязі. 1999. № 1. С. 176–177.
7. Manual. Quality and Reliability. Philosophy and Procedures. AN-RQC-REP013V20 / NEC Electronics (Europe) GmbH, 1993. 132 p.
8. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. Orleans, 1998. 21 p.
9. Bipolar Power Transistors Data Book 1998 / TEMIC Semiconductor GmbH. DGT-005-1297, 1997. 251 p.
10. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Изв. Белорус. инж. акад. 2001. № 1 (11)/3. С. 232–234.