

УДК 621.382.019.3

ИНТЕРВАЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ ДЕГРАДАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

С.М. БОРОВИКОВ

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

Поступила в редакцию 1 апреля 2013

При индивидуальном прогнозировании значений параметра и, следовательно, постепенных отказов изделий электронной техники (ИЭТ) методом имитационных воздействий, о достоверности прогнозирования можно судить по средней ошибке прогнозирования, которая дает представление о достоверности прогноза лишь в среднем. В частных случаях для нового (j -го) экземпляра отклонение истинного значения параметра может заметно отличаться от прогнозного значения. Для практических задач прогнозирования постепенных отказов ИЭТ для будущих наработок важно иметь и интервальный прогноз функционального параметра. Этот прогноз предлагается получать, используя контрольную выборку и гипотезу о нормальном распределении относительной ошибки прогнозирования значений параметра ИЭТ.

Ключевые слова: изделия электронной техники, биполярные транзисторы, деградация электрических параметров, метод имитационных воздействий, прогнозирование постепенных отказов, средняя ошибка прогнозирования, интервальный прогноз функционального параметра.

Введение

При работе изделий электронной техники (ИЭТ) в электрических схемах устройств их функциональный параметр изменяется (говорят, деградирует) и может рассматриваться как функция времени t . Постепенное изменение параметра (обозначим его через P) во времени и выход его за пределы установленных норм определяет такое понятие как постепенный отказ ИЭТ. Надежность по постепенному отказу характеризует способность ИЭТ сохранять уровень функционального параметра $P(t)$ 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. В качестве количественной меры уровня этой надежности используют вероятность $R_n(t_3)$, определяемую как [1–3]

$$R_n(t_3) = R\{a \leq y(t) \leq b, t \leq t_3\}, \quad (1)$$

где $R\{\dots\}$ – вероятность выполнения условия, указанного в фигурных скобках.

Надежность по постепенным отказам может рассматриваться как составляющая общей надежности ИЭТ.

Актуальность разработки

По мере развития технологии ИЭТ причины возникновения внезапных отказов могут быть в значительной степени устранены [1, 2, 4, 5]. Постепенные отказы, отражающие внутренне присущие материалам ИЭТ свойства, в частности старение, исключить невозможно. Этим вызван повышающийся интерес к постепенным (деградационным) отказам ИЭТ. Известно [6], что постепенные отказы ИЭТ можно прогнозировать. Для прогнозирования

значений параметров ИЭТ для будущих наработок привлекателен, как показано в [2, 7], метод имитационных воздействий. В его основу положен принцип статистической аналогии между изменениями параметра ИЭТ, вызванными длительным функционированием изделия с одной стороны, и кратковременным воздействием в момент $t=0$ определенного фактора, имитирующего изменение параметра и не вызывающего уменьшение рабочего ресурса ИЭТ, – с другой стороны.

Для реализации метода имитационных воздействий необходимо для ИЭТ определить закономерности изменения функционального параметра P от уровня имитационного фактора F и от длительной наработки t [2, 7–9]. С учетом этих закономерностей получают имитационную модель, представляющую собой выражение (функцию пересчета), показывающее, как рассчитать значение имитационного фактора F (обозначим его как $F_{им}$), обеспечивающее такое же изменение прогнозируемого функционального параметра P за интересующую наработку t_3 , что и действие в начальный момент времени имитационного фактора уровня $F_{им}$:

$$F_{им} = f(t = t_3), \quad (2)$$

где f – символ функциональной связи.

Решение о возможном постепенном отказе конкретного экземпляра для заданной наработки t_3 принимают по результатам простейшего эксперимента – измерения у экземпляра в начальный момент времени ($t = 0$) значения функционального параметра при имитационном воздействии $F_{им}$, уровень которого рассчитан для интересующей наработки по заранее полученной функции пересчета (2), и сравнения результата измерения параметра с нормой. При реализации метода имитационных воздействий возникает вопрос о достоверности прогноза и эффективности самого метода на практике.

Эффективность метода определяется удачным выбором имитационного воздействия, о чем можно судить по функции пересчета вида (2), полученной с использованием результатов обучающего эксперимента.

Заключение о пригодности функции пересчета для наработки t можно сделать по значению средней ошибки прогнозирования $\Delta_{ср}(t)$ функционального параметра P . Оценку этой ошибки $\Delta_{ср}(t)$ предложено определять с использованием контрольной выборки по формуле [2, 9]:

$$\Delta_{ср}(t) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{P_{пр i} - P_{ист i}}{P_{ист i}} \right)^2} \times 100\%, \quad (3)$$

где m – объем контрольной выборки; $P_{пр i}$ – прогнозное значение функционального параметра P , полученное для i -го экземпляра контрольной выборки для заданной наработки t ; это значение получают путем измерения P при действии на ИЭТ имитационного фактора в момент времени $t = 0$; $P_{ист i}$ – истинное значение функционального параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для заданной наработки t ; это значение получают в результате испытаний ИЭТ на заданную наработку.

Напомним, что контрольная выборка – это та выборка ИЭТ, которая используется сугубо для оценки ошибок прогнозирования. Если средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}(t) \leq (5 \dots 7)\%$, то это значение обычно считают приемлемым для практики [2, 9].

Испытания обучающей и контрольной выборок по экономическим соображениям целесообразно проводить одновременно. Для этого случайным образом формируется выборка ИЭТ рассматриваемого типа. Ее общий объем N включает обучающую выборку объемом n и контрольную – объемом m . Результаты испытаний первой выборки используют для получения функции пересчета (2), а результаты испытаний второй выборки – только для определения ошибок прогнозирования.

Средняя ошибка прогнозирования $\Delta_{ср}(t)$, определение которой рассмотрено в [2, 9], позволяет судить о достоверности прогнозирования рассматриваемого параметра P для наработки t лишь в среднем. В частных случаях для нового (j -го) экземпляра отклонение истинного значения параметра $P_{ист j}$ может заметно отличаться от его прогнозного значения $P_{пр j}$. Поэтому для практических задач прогнозирования постепенных отказов ИЭТ (значений функциональных параметров) для будущих наработок важно иметь и интервальный прогноз. Наличие интервального прогноза для функционального параметра P позволит более

обоснованно принимать решение о возможном постепенном отказе ИЭТ для интересующих наработок.

Теоретический анализ

Интервальный прогноз функционального параметра ИЭТ будем задавать с помощью доверительного интервала $I_\gamma^{(P)}$, соответствующего доверительной вероятности (достоверности) γ :

$$I_\gamma^{(P)} = [P_{\text{пр}j}(t) - \Delta P(t); P_{\text{пр}j}(t) + \Delta P(t)] = [P_{\text{ниж}}^{(j)}; P_{\text{верх}}^{(j)}], \quad (4)$$

где γ – выбранная доверительная вероятность, обычно $\gamma \geq 0,9 \dots 0,99$; $P_{\text{пр}j}(t_n)$ – точный прогноз функционального параметра P j -го экземпляра для заданной будущей наработки t , его получают путем измерения параметра P при наличии имитационного воздействия, соответствующего заданной наработке t ; $\Delta P(t)$ – возможное расхождение между точечной оценкой $P_{\text{пр}j}(t_n)$ и истинным значением параметра P в момент времени t , эта величина может принимать разные значения в зависимости от выбранной доверительной вероятности; $P_{\text{ниж}}^{(j)}$, $P_{\text{верх}}^{(j)}$ – соответственно нижняя и верхняя границы доверительного интервала (интервального прогноза), найденные для j -го экземпляра при доверительной вероятности γ .

В зависимости от физической сути и тенденции изменения рассматриваемого функционального параметра P во времени, а также критериев постепенных отказов ИЭТ по данному параметру, исследователя может интересовать либо нижняя $P_{\text{ниж}}^{(j)}$, либо верхняя $P_{\text{верх}}^{(j)}$ доверительная граница. Для нахождения этих границ необходимо знать величину $\Delta P(t)$. Автором [9] предлагается величину $\Delta P(t)$ определять, используя результаты исследования экземпляров контрольной выборки.

Прогнозное значение $P_{\text{пр}i}$ параметра P i -го экземпляра контрольной выборки можно получить с помощью интерполяции функции вида

$$P_i = f_1(F), \quad (5)$$

где F – имитационный фактор; f_1 – символ функциональной связи, вид которой определяется прикладной программой для ЭВМ, используемой для построения функций (5).

При этом принимают во внимание значения P_i , соответствующие точкам имитационного фактора F , между которыми окажется имитационное значение $F_{\text{им}}$, рассчитанное для интересующей наработки по построенной функции пересчета (2), полученной при реализации метода имитационных воздействий [2, 7].

Истинное значение $P_{\text{ист}i}$ параметра P i -го экземпляра контрольной выборки для наработки t фиксируют в процессе испытаний этой выборки на длительную наработку (если в момент времени t выполнялся контроль параметра P), либо определяют с помощью интерполяции построенных по результатам испытаний функций вида

$$P_i = f_2(t); i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где P_i – истинное значение параметра P i -го экземпляра контрольной выборки; f_2 – символ функциональной зависимости, конкретный вид которой определяется прикладной программой для ЭВМ, используемой для построения функций (6).

Для определения относительной ошибки прогнозирования $\Delta P_i/P_i$, соответствующей i -му экземпляру контрольной выборки, предложено использовать выражение [2, 9]

$$\frac{\Delta P_i}{P_i} = \frac{P_{\text{пр}i} - P_{\text{ист}i}}{P_{\text{ист}i}} 100\% ; i = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

где m – объем контрольной выборки.

Определив по формуле (7) значения $\Delta P_i/P_i$ для всех m экземпляров контрольной выборки, представится возможным для величины $\Delta P_i/P_i$ построить гистограмму распределения и принять гипотезу о подходящем законе распределения. Выбранный закон распределения величины $\Delta P_i/P_i$ позволит обоснованно определить значение $\Delta P(t)$ в выражении (4) и,

следовательно, получать интервальный прогноз параметра P новых экземпляров ИЭТ рассматриваемого типа.

Экспериментальные исследования

В качестве ИЭТ, на примере которых иллюстрировался метод получения интервального прогноза функционального параметра, были выбраны биполярные транзисторы большой мощности типа КТ872А. Функциональным параметром, значения которого прогнозировались с целью принятия решения о постепенном отказе транзисторов, являлся $h_{21Э}$ (статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером) при токе коллектора $I_K = 0,1$ А и напряжении коллектор-эмиттер $U_{КЭ} = 5$ В. При выполнении исследований использовалось два имитационных фактора: температура и ток коллектора. 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 $t = 0$ снимались зависимости параметра $h_{21Э}$ от тока коллектора в диапазоне от 0,01 до 8А и от температуры в диапазоне от -60 до $+125$ °С. Затем обе выборки транзисторов испытывались на длительную наработку. Использовались ускоренные форсированные испытания, выполняемые по типовым методикам [10–12]. Время ускоренных испытаний составляло 216 ч, что эквивалентно наработке 15000 ч в нормальных условиях работы.

В качестве величины $\Delta P/P$ рассматривалась относительная ошибка прогнозирования параметра $h_{21Э}$ (величина $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$), получаемая для экземпляров контрольной выборки. На рис. 1 и 2 как примеры показаны гистограммы распределения $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$, построенные для наработок $t = 11100$ и $t = 15000$ ч для случая использования температуры в качестве имитационного фактора.

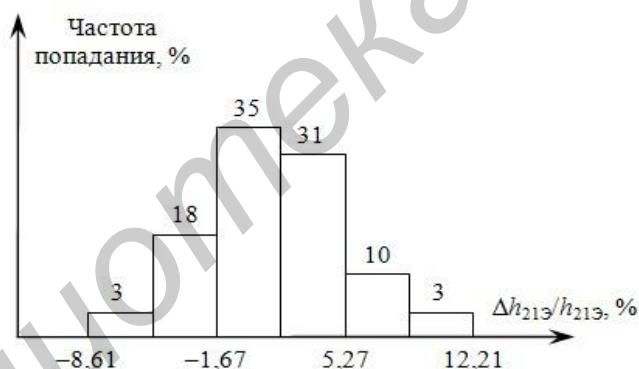


Рис. 1. Гистограмма распределения $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$ ($U_{КЭ} = 5$ В; $I_K = 0,1$ А) для наработки $t = 11100$ ч, имитационный фактор – температура

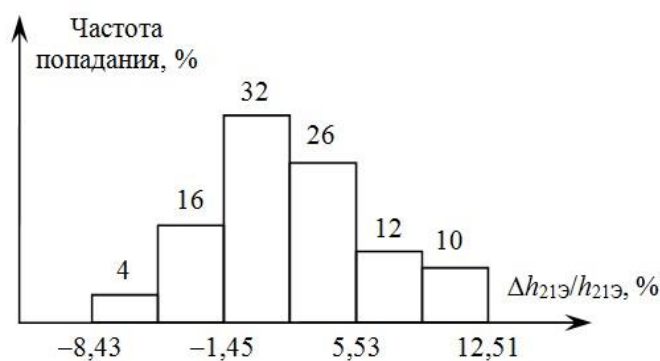


Рис. 2. Гистограмма распределения $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$ ($U_{КЭ} = 5$ В; $I_K = 0,1$ А) для наработки $t = 15000$ ч, имитационный фактор – температура

На рис. 3 и 4 показаны гистограммы распределения относительной ошибки $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$ для некоторых наработок в случае использования тока коллектора в качестве имитационного фактора.

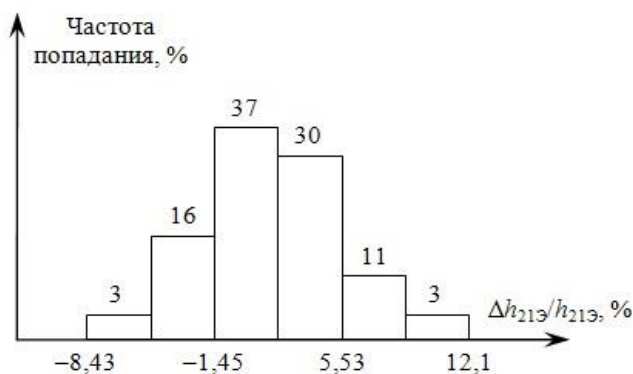


Рис. 3. Гистограмма распределения $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$ ($U_{КЭ} = 5$ В; $I_{К} = 0,1$ А) для наработки $t = 11100$ ч, имитационный фактор – ток коллектора

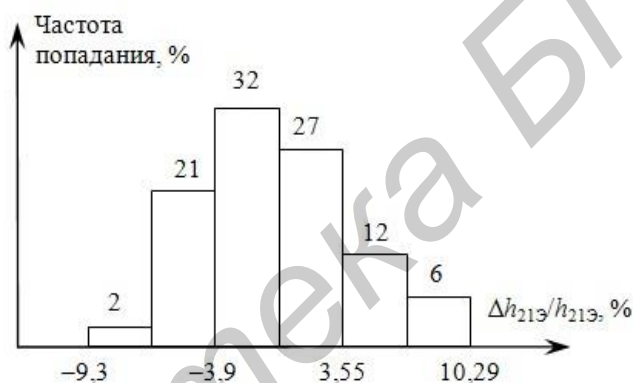


Рис. 4. Гистограмма распределения $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$ ($U_{КЭ} = 5$ В; $I_{К} = 0,1$ А) для наработки $t = 15000$ ч, имитационный фактор – ток коллектора

Применение статистических критериев согласия показало, что распределение относительной ошибки прогнозирования параметра $h_{21Э}$ исследуемых типов транзисторов не противоречит гипотезе о нормальном законе распределения. Этот вывод подтвердился и на примере параметре $U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер).

В табл. 1 приведены средние значения $M(\Delta P/P)$ и средние квадратические отклонения $\sigma(\Delta P/P)$ относительной ошибки прогнозирования параметра $P \rightarrow h_{21Э}$, найденные для некоторых наработок t биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А.

Таблица 1. Значения $M(\Delta P/P)$ и $\sigma(\Delta P/P)$ относительной ошибки прогнозирования $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$

Наработка, ч	Имитационный фактор			
	Температура		Ток коллектора	
	$M(\Delta P/P)$, %	$\sigma(\Delta P/P)$, %	$M(\Delta P/P)$, %	$\sigma(\Delta P/P)$, %
3330	1,54	2,93	1,38	3,39
7220	2,12	3,04	2,12	2,98
11100	0,54	3,55	0,68	3,49
13050	-1,48	4,69	-1,66	4,07
15000	0,60	3,47	0,06	3,37
16950	-2,90	4,89	-2,19	3,95

Принимая гипотезу о нормальном законе распределения относительной ошибки прогнозирования $\Delta P/P$, величина $P_{ниж}^{(j)}$ в выражении (4) может быть определена как

$$P_{\text{ниж}}^{(j)} = \left[1 + \frac{M(\Delta P/P) - t_\gamma \sigma(\Delta P/P)}{100} \right] P_{\text{пр } j}(t), \quad (8)$$

где t_γ – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности γ .

Величина $P_{\text{верх}}^{(j)}$ выражения (4) примет вид

$$P_{\text{верх}}^{(j)} = \left[1 + \frac{M(\Delta P/P) + t_\gamma \sigma(\Delta P/P)}{100} \right] P_{\text{пр } j}(t). \quad (9)$$

В выражениях (8) и (9) величины $M(\Delta P/P)$ и $\sigma(\Delta P/P)$ относительной ошибки прогнозирования $\Delta P/P$ необходимо подставлять в процентах. С учетом гипотезы о нормальном законе распределения ошибки прогнозирования $\Delta P/P$ при значении коэффициента $t_\gamma = 2$ интервальный прогноз (4), получаемый с использованием выражений (8) и (9), будет гарантироваться с вероятностью $\gamma \approx 0,95$, а при $t_\gamma = 3$ – с вероятностью $\gamma = 0,9973$ [3], то есть практически с вероятностью, равной единице.

Анализ влияния погрешностей измерения имитационных факторов

Проанализируем, как влияет погрешность поддержания значений имитационных факторов на ошибку прогнозирования электрических параметров транзисторов исследуемого типа. В экспериментах погрешность поддержания значений температуры составляла ± 2 градуса, значений тока коллектора – не более ± 5 мА (для транзисторов большой мощности типа КТ872А). В качестве функционального параметра P будем рассматривать $h_{21Э}$. Заданную наработку t выберем равной значению 15000 ч, приводимому в технической документации на транзисторы типа КТ872А.

Пользуясь функциями пересчета вида (2), приведенными в [2], вычислены значения имитационной температуры $T_{\text{им}}$ и имитационного тока коллектора $I_{\text{ким}}$ для наработки $t = 15000$ ч: $T_{\text{им}} = 289,1$ К; $I_{\text{ким}} = 504,75$ мА.

С использованием экспериментальных зависимостей $h_{21Э}$ от тока коллектора и от температуры [2] подсчитаны половина поля рассеивания (δ) и среднее квадратическое отклонение (σ) относительной ошибки $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$ прогнозирования $h_{21Э}$, обусловленной погрешностями поддержания значений имитационных факторов (табл. 2).

Таблица 2. Влияние погрешности поддержания имитационных факторов на относительную ошибку прогнозирования параметра $h_{21Э}$ транзисторов типа КТ872А

Имитационный фактор	Ток коллектора $I_{\text{к}}$, мА	Температура T , К
Обозначение имитационного уровня	$I_{\text{ким}} \pm \Delta I_{\text{к}}$, мА	$T_{\text{им}} \pm \Delta T$, К
Значение имитационного уровня	$504,45 \pm 5$	$289,1 \pm 2$
$\delta(\Delta h_{21Э} / h_{21Э})$, %	0,23	1,71
$\sigma(\Delta h_{21Э} / h_{21Э})$, %	0,077	0,57

При определении $\sigma(\Delta h_{21Э} / h_{21Э})$ принята гипотеза о нормальном законе распределения относительной ошибки $\Delta h_{21Э} / h_{21Э}$. Кроме того, с использованием функций пересчета [2] установлено, что при выбранных погрешностях поддержания имитационных воздействий $F_{\text{им}}$ максимальная ошибка для наработки $t = 15000$ ч, для которой определена прогнозная оценка параметра $h_{21Э}$, не превышает следующих значений: ± 2500 ч – в случае температуры $T_{\text{им}}$; ± 300 ч – в случае тока коллектора $I_{\text{ким}}$.

Заключение

На примере деградационных изменений электрических параметров $h_{21Э}$ (статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером) и $U_{\text{кэнас}}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер), вызываемых длительной работой биполярных транзисторов, исследовано распределение относительной ошибки прогнозирования параметров ИЭТ при получении прогноза методом имитационных воздействий. Подтверждена гипотеза о нормальном законе

распределения этой ошибки, что позволило предложить расчетные формулы для определения доверительных границ прогнозного значения параметра (получить интервальный прогноз).

Предложенный автором подход определения интервального прогноза электрического параметра ИЭТ с учетом его возможной деградации в течение заданной наработки апробирован на транзисторах большой мощности типа КТ872А.

Использование интервального прогноза параметра ИЭТ позволяет сделать более достоверный прогноз о возможном постепенном отказе конкретного экземпляра для интересующей наработки. При этом необходимо принять во внимание либо нижнюю, либо верхнюю доверительную границу прогнозируемого параметра в случаях односторонней нормы на интересующий параметр и обе доверительные границы – при двухсторонней норме.

INTERVAL FORECAST OF DEGRADATION OF ELECTRICAL PARAMETER FOR ELECTRONIC DEVICES

S.M. BARAVIKOU

Abstract

In individual forecasting of parameter values and, therefore, gradual refuses of electronic devices' (ED) with simulation effects method the reliability prediction can be judged by average prediction error, which gives only average reliability prediction picture. In particular cases parameter's true value deviation for a new instance can differ noticeably from the predicted values. For practical problems of ED gradual failures forecasting for future developments it's important to have interval forecast of functional parameter. This forecast is proposed to be obtained by using the control sample and hypothesis on the normal distribution of ED parameter values forecasting relative error.

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. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Минск, 1998.
4. Боровиков С.М., Шалак А.В., Бересневич А.И. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 105–109.
5. Боровиков С. М., Шалак А.В., Бересневич А.И. и др. // Докл. БГУИР. 2008. № 6 (36). С. 32–39.
6. European Organization of the Quality Control Glassary. Bern, 1988.
7. Боровиков С.М., Щерба А. И. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2004. № 4. С. 37–40.
8. Боровиков С.М. Щерба А.И. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С. 113–117.
9. Боровиков С.М., Бересневич А.И., Шалак А.В. // Докл. БГУИР. 2006. № 3 (15). С. 12–17.
10. Manual. Quality and Reliability. Philosophy and Procedures. AN-RQC-REP013V20 / NEC Electronics (Europe) GmbH, 1993. 132 p.
11. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. Orleans, 1998. 21 p.
12. Bipolar Power Transistors Data Book 1998 / TEMIC Semiconductor GmbH. DGT-005-1297, 1997.