

Методика определения параметров PSPICE-моделей IGBT-транзисторов

Имеющиеся в библиотеках программы PSPICE параметры встроенной модели IGBT-транзисторов недостаточно точно описывают справочные характеристики. Определение параметров встроенной модели при помощи программы PSPICE Model Editor также не дает удовлетворительных результатов. Поэтому используется известная составная модель IGBT-транзистора как комбинации МДП и биполярного р-п-р транзисторов. Цель данной статьи — более точное определение параметров этой модели по справочным характеристикам как при помощи универсальной математической системы MathCad, так и при помощи программы параметрической оптимизации PSPICE Optimizer.

**Игорь Недолужко,
к. т. н.**

nedol@orc.ru

Алексей Лебедев

alexey@netmap.ru

В последних версиях программы схемотехнического моделирования PSPICE IGBT-транзистор представлен встроенной моделью [1]. В библиотеках системы PSPICE указываются параметры некоторых типов IGBT-транзисторов для этой модели, однако расчет по ней, как правило, дает большие погрешности [2]. Модель описывается следующими параметрами (на примере транзистора IRGBC30F, для которого представлены достаточно полные справочные данные, а его параметры имеются в стандартной библиотеке):

```
.MODEL IRGBC30F NIGBT (TAU=264.07E-9 KP=1.6985 AREA=60.000E-6
AGD=7.7500E-6 VT=4.7055 KF=1.9385 CGS=990.49E-12 COXD=3.7832E-9
VTD=-7.2340)
```

В справочниках приводятся: проходная характеристика I_c от V_{ge} , характеристика насыщения V_{ce} от I_c , зарядная характеристика V_g от Q_g , а также времена переключения T_{dr} , T_{rs} , T_{df} , T_{fl} , энергия включения E_{on} и полная энергия E_{total} для типовой схемы.

На рис. 1 приведены справочные и рассчитанные в PSPICE статические характеристики стандартной

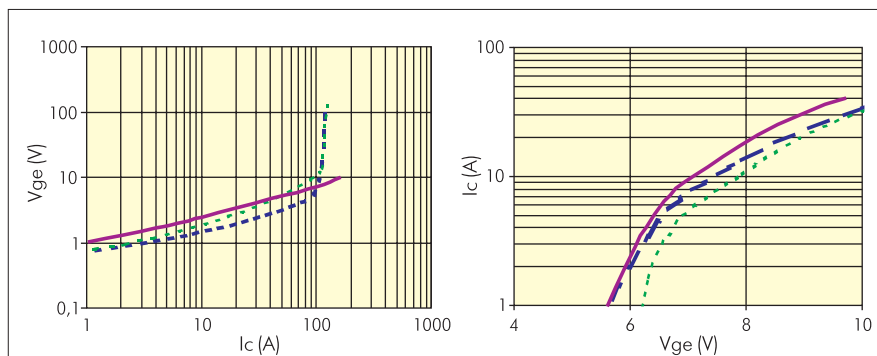


Рис. 1. Статические характеристики IGBT-транзистора IRGBC30F

(сплошной розовой линией отображены справочные характеристики, синей прерывистой — расчетные характеристики встроенной модели с библиотечными параметрами, зеленой прерывистой — расчетные характеристики встроенной модели с параметрами из Model Editor)

модели транзистора IRGBC30F с библиотечными параметрами.

Времена переключения и энергии измерялись в типовой схеме [3], изображенной на рис. 2. Результаты сопоставлены со справочными и сведены в таблице 1.

Как видно из рис. 1 и таблицы 1, библиотечные параметры модели неплохо описывают статические характеристики, но дают очень большую (66%) относительную среднеквадратичную ошибку при расчете времен переключения и энергий.

Для самостоятельного получения параметров приборов в PSPICE применяется программа Model Editor. В ней параметры встроенной модели определяются по справочным характеристикам: проходной характеристике, характеристике насыщения, зарядной характеристике и времени заднего фронта тока T_{fl} .

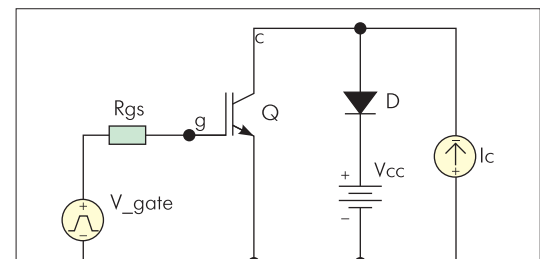


Рис. 2. Типовая схема включения IGBT-транзистора для расчета времен и энергий переключения

Таблица 1

Транзистор IRGBC30F ($I_c=17$ А, $V_{cc}=480$ В, $V_{ge}=15$ В, $R_g=23$ Ом)	T_{don} , нс	T_{rs} , нс	T_{doff} , нс	T_{fl} , нс	E_{on} , мДж	E_{total} , мДж	ОСО, %
Справочные времена и энергии переключения	25	21	210	300	0,3	2,4	
Расчет по библиотечной PSPICE-модели	6,4	2	106	446	0,055	1,6	66
Расчет по PSPICE-модели из Model Editor	12	4	138	388	0,158	1,6	49

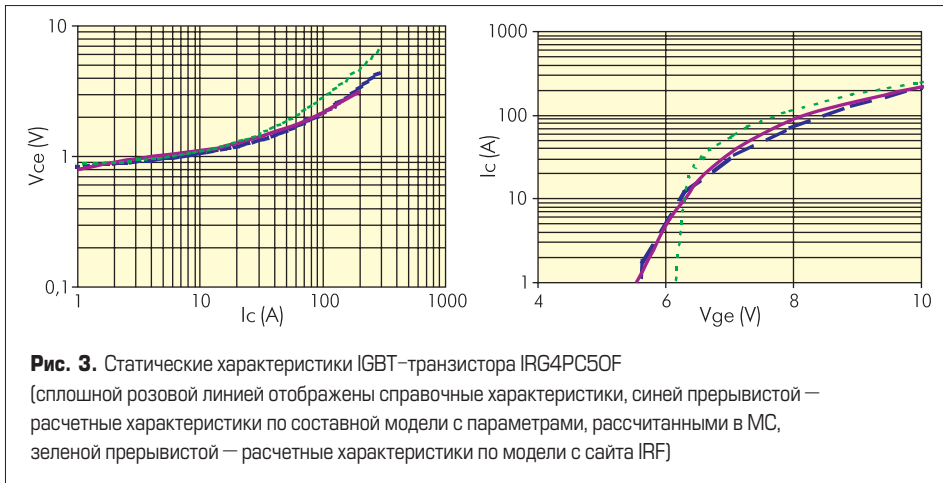


Рис. 3. Статические характеристики IGBT-транзистора IRG4PC50F (сплошной розовой линией отображены справочные характеристики, синей прерывистой — расчетные характеристики по составной модели с параметрами, рассчитанными в MC, зеленой прерывистой — расчетные характеристики по модели с сайта IRF)

Таблица 2

Транзистор IRG4PC50F (Ic=39 А, Vce=480 В, Vge=15 В, Rg=5 Ом)	Tdon, нс	Trs, нс	Tdoff, нс	Tfl, нс	Eon, мДж	Etotal, мДж	ОСО, %
Справочные времена и энергии переключения	31	25	240	130	0,37	2,47	
Расчет по PSPICE-модели с сайта IRF	19	0,8	237	295	0,103	3,86	77%
Расчет по составной модели с параметрами из MathCad	32	14	249	145	0,224	1,49	30%
Расчет по составной модели с параметрами из Optimizer	32	26	240	129	0,369	1,51	16%

Ниже приведены параметры транзистора IRGBC30F, определенные с помощью программы Model Editor:

```
.MODEL IRGBC30F_ME NIGBT (TAU=240,28E-9 KP=2.0430
AREA=15.500E-6 AGD=6.2000E-6 VT=5.2781 KF=1.0153
CGS=5.3323E-9 COXD=18.116E-9 VTD=-5)
```

Расчитанные в PSPICE статические характеристики модели с параметрами из Model Editor приведены на рис. 1.

Результаты измерений времен переключения и энергий с этими параметрами также приведены в таблице 1. Относительная среднеквадратичная ошибка в этом случае немного меньше, но все равно достаточно велика (49%).

Как показывает опыт, подобная же ситуация возникает и с прочими IGBT-транзисторами, содержащимися в стандартной библиотеке.

Таким образом, показано, что имеющиеся параметры приборов и методика определения их параметров при проверке дает низкую точность.

Кроме того, имеющийся в стандартной библиотеке PSPICE набор транзисторов относительно невелик и на сегодняшний день уже устарел. Транзисторов новых поколений в нем нет.

Что делать, если мы хотим использовать при моделировании новые приборы? Модели новых приборов можно отыскать в Интернете на сайтах ведущих фирм-производителей. Однако насколько расчет по найденным таким образом моделям согласуется со справочными данными?

Возьмем для примера с сайта International Rectifier модель транзистора четвертого поколения IRG4PC50F. Текст модели здесь не приводится, так как он довольно объемный, эту модель, как и многие другие модели продукции IRF, можно скачать по адресу <http://www.irf.com/product-info/models/spice/spice.zip>. Отметим, однако, что эта модель является не встроенной, а составной, состоящей из МДП и биполярного p-n-p транзисторов. Структура подобной модели подробнее рассмотрена ниже.

На рис. 3 приведены справочные и рассчитанные в PSPICE статические характеристики IRF-модели транзистора IRG4PC50F.

Времена переключения и энергии, измеренные в той же типовой схеме, сопоставлены со справочными данными и сведены в таблице 2.

Видно, что динамические свойства модели с сайта IRF плохо соотносятся со справочными данными. Относительная среднеквадратичная ошибка 77%.

Таким образом, видна плохая точность предлагаемых моделей при моделировании переключения IGBT-транзисторов.

Чтобы уменьшить ошибку при моделировании, предлагается использовать известную составную модель IGBT-транзистора [2], состоящую из МДП и биполярного p-n-p транзисторов — подобную той, что используется в модели с сайта IRF (рис. 4). Причем биполярный транзистор работает или в отсечке, или в активной области, а МДП-транзистор — и в отсечке, и в активной, и в насыщении.

Вообще говоря, такая модель описывается большим числом параметров, что позволяет более гибко настраивать ее характеристики.

Некоторые шаги в этом направлении уже были предприняты ранее [2], однако, как кажется авторам, исследования, опубликованные в этой статье, имеют ряд недостатков. К числу недостатков можно отнести: сопос-

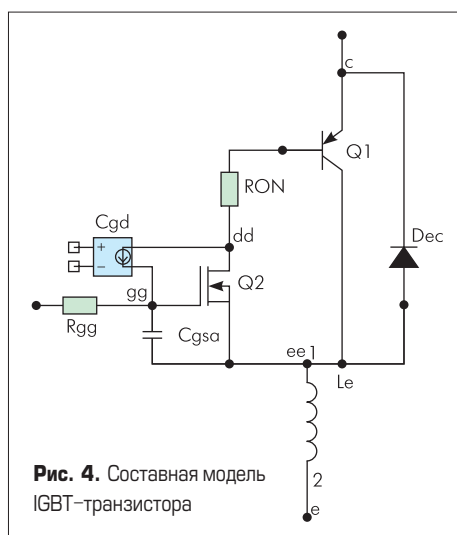


Рис. 4. Составная модель IGBT-транзистора

тавление только времен выключения — не учитывались прочие времена и энергии, а главное — отыскание параметров осуществлялось методом подбора.

Используемые параметры биполярного транзистора: Is, Nf, Bf, Vtf, Xtf, Tf. Прочие в списке параметров не указываются.

Параметры МДП-транзистора, используемые в модели: Kp, Vto. Прочие в списке параметров не указываются.

Также в качестве параметров задействованы сопротивления Ron, Rgg, индуктивность эмиттера Le, постоянная емкость Cge=Cgs и параметры нелинейных емкостей Cse и Csg.

Проходная нелинейная емкость Crss = Cgc = Cgd здесь записывается как источник тока, зависящий от потенциалов dd-gg следующим образом:

$$\text{value} = \{ (C0 - C1 \times \arctan((V(\text{dd,gg}) + V1) / \sqrt{V2})) \times \text{DDT}(V(\text{dd,gg})) \}$$

где C0, C1, V1, V2 — параметры нелинейной емкости. Нелинейную емкость Cgd можно задавать и иными способами, например табличным методом. Функция арктангенса была взята здесь только из-за ее плавности и возможности получать постоянное значение емкости при отрицательном напряжении (см. рис. 5).

Роль нелинейной емкости Cse здесь играет емкость диода, которая определяется параметрами Cjo, M, Vj.

Параметры составной модели предлагается определять в универсальной математической системе MathCad (MC) следующим образом:

Значение параметров емкостей IGBT-транзистора определяется из справочных зависимостей Crss, Ciss, Coss от напряжения и из зарядной характеристики. Емкость Cgs = Ciss - Crss считается постоянной Cgsa и примерно равной первому наклону зарядной характеристики.

$$C_{gs} = \frac{Q_{gp1}}{U_{gsp1}}$$

Проходная емкость Crss, в основном определяемая емкостью МДП-транзистора Cgd, аппроксимируется с использованием плавной функции atan:

$$C(U, C0, C1, V1, V2) = C0 - C1 \times \text{atan} \left(\frac{U + V1}{\sqrt{V2}} \right)$$

Следует заметить, что практически все IGBT-транзисторы имеют емкостные характеристики, которые трудно аппроксимировать плавными функциями, поэтому провести аппроксимацию по всем точкам справочной зависимости не удастся. Однако это не столь существенно — важна верная аппроксимация максимального значения проходной емкости Cgdх при отрицательном напряжении.

Это максимальное значение Cgdх находится из второго наклона зарядной характеристики:

$$C_{gdx} = \left(\frac{Q_{gp3} - Q_{gp2}}{U_{gsp3} - U_{gsp2}} - C_{gs} \right)$$

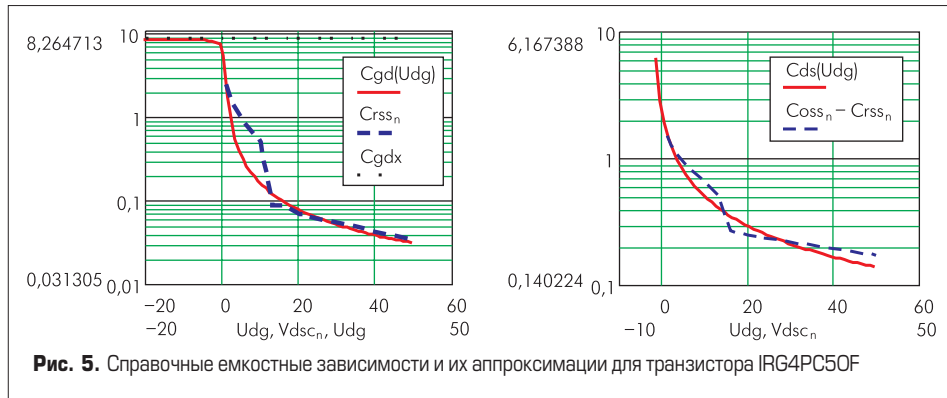


Рис. 5. Справочные емкостные зависимости и их аппроксимации для транзистора IRG4PC50F

Емкость $C_{ds} = C_{oss} - C_{r_{ss}}$ не столь важна и аппроксимируется обычной степенной функцией, как для диода:

$$C(U, C_0, M, V) = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{U}{V}\right)^M}$$

Чтобы определить параметры емкостей в МС, необходимо приравнять значения аппроксимации значениям справочных характеристик и воспользоваться блоком given-minerr. Начальные условия: $M = 0.5$, $V = 1$, $C_0 = 1n$, $C1 = C0 = 0.1$, $V1 = V2 = 1$.

Для транзистора IRG4PC50F значения этих параметров получились следующими: $V1 = -0.637$, $V2 = 0.564$, $C0 = 4.039n$, $C1 = 2.57n$, $C_{dso} = 2.181n$, $V_{jds} = 2.321$, $M_{ds} = 0.886$, $C_{gs} = 4.224n$, $C_{gdx} = 8.265n$.

На следующем графике изображена зарядная характеристика, рассчитанная по емкостным параметрам и соотношенная со справочной.

Статические параметры определяются в МС на основе кусочно-линейного анализа модели IGBT-транзистора [1]:

$$U_{ce}(I, I_s, N_f, R_{on}, B_f, \beta, V_{to}) = \left[R_{on} + \frac{1}{2 \times \beta \times (V_{gs} - V_{to})} \right] \times \frac{I}{B_f + 1} + V_t \times N_f \times \ln \left(1 + \frac{I}{I_s} \right)$$

$$I_c(U, \beta, V_{to}, B_f) = \beta \times (B_f + 1) \times (U - V_{to})^2$$

Два этих выражения описывают характеристику насыщения и проходную характеристику IGBT-транзистора. $\beta = 0.5 \times K_p \times W/L$, то есть при $W = 2u$, $L = 1u$ β становится равной K_p .

Чтобы определить параметры I_s , N_f , R_{on} , B_f , β , V_{to} в МС, необходимо приравнять значения аппроксимации значениям справочных характеристик и воспользоваться блоком given-minerr.

Начальные условия: $I_s = 10e^{-12}$, $N_f = 1.5$, $R_{on} = 0.01$, $B_f = 2$, $\beta = 2.5$, $V_{to} = 5$. Следует отметить, что ток МДП-транзистора составляет значительную долю от тока всей структуры, поэтому коэффициент усиления B_f не может быть большим и должен быть сравним с β .

Для транзистора IRG4PC50F значения параметров получаются следующие:

$I_s = 3.42e^{-8}$, $\beta = 1.914$, $B_f = 2.352$, $R_{on} = 0.018$, $N_f = 1.914$, $V_{to} = 5.005$.

Выключение IGBT происходит так: первым выключается МДП-транзистор, обрывая базу биполярному транзистору, и выключение всего IGBT определяется выключением р-п-р транзистора с оборванной базой. Заряд выводится из него путем рекомбинации, процесс происходит экспоненциально, с постоянной времени τ . Этап спада T_{fr} заканчивается, когда ток достигает уровня 0.1 от максимального, откуда τ :

$$\tau = \frac{T_{fr}}{\ln \left[\frac{B_f \times 10}{(1 + B_f)} \right]}$$

где T_{fr} — справочное время спада тока.

T_f связано с τ следующим образом: $T_f = \tau/B_f$. Внутреннее сопротивление затвора можно определить из справочной задержки включения, определяемой «полевой» частью IGBT-транзистора:

$$R_{gg} = \left[\text{root} \left[T_g + (R_{gs} + R_{gg}) \times C_{gs} \times V_{to} \left(\frac{V_{gs}}{V_{gs} - V_{to}} \right) - T_{dnp}, R_{gg} \right] \right]$$

Здесь T_g — фронт импульса генератора. Начальные условия $R_g = 10$, $T_g = 10ns$.

Для транзистора IRG4PC50F значения параметров получаются следующие: $T_f = 28.366ns$, $R_{gg} = 6.707$.

На рис. 3 приведены рассчитанные в PSPICE статические характеристики составной модели с параметрами, определенными в МС. Заметно, что они совпадают лучше, чем характеристики модели с сайта IRF.

Времена переключения и энергии, измеренные в той же типовой схеме, для составной модели с параметрами, определенными в МС, приведены в таблице 2. Видно, что относительная среднеквадратичная ошибка почти вдвое меньше ошибки IRF-модели (30%).

Составная модель обладает большим, нежели было рассмотрено, числом параметров, что придает ей большую гибкость. Однако не все параметры можно определить в МС из-за чрезмерного усложнения аппроксимирующих выражений, которые необходимо записывать

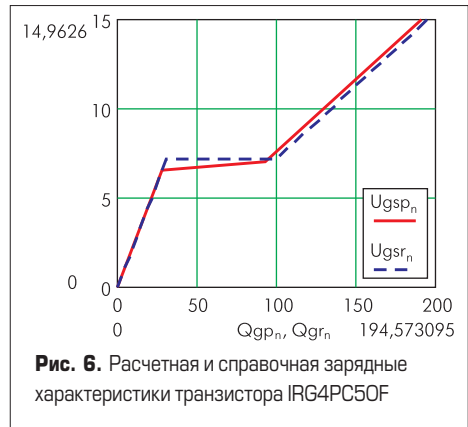


Рис. 6. Расчетная и справочная зарядные характеристики транзистора IRG4PC50F

в аналитическом виде. Так, например, в МС очень трудно учесть влияние индуктивности, в то же время индуктивность эмиттера L_e оказывает большое влияние на динамические процессы. Также большое влияние на динамику оказывают параметры динамического насыщения биполярного транзистора V_{tf} , X_{tf} , неучтенные при расчете в МС. Приведенные здесь формулы для расчета T_f и R_{gg} носят весьма приближенный характер. Кроме того, на динамику оказывает влияние соотношение между параметрами усиления транзисторов K_p и B_f . Если уточнить все вышеперечисленные параметры, то модель может быть настроена еще точнее. Как это сделать?

Подобную настройку можно осуществить при помощи программы параметрической оптимизации PSPICE Optimizer.

Вообще говоря, определение статических параметров I_s , N_f , B_f , R_{on} , K_p , V_{to} по справочным характеристикам также можно осуществлять в этой программе по характеристике насыщения и проходной характеристике. Для этого указанные параметры внутри модели задаются варьируемыми, в одном проекте помещаются две модели транзистора, подключенные к одному варьируемому источнику напряжения. Для моделирования проходной характеристики источник напряжения является переменным напряжением на затворе, при этом снимается ток транзистора. Для моделирования характеристики насыщения источник напряжения, подключенный к коллектору транзистора через сопротивление, является переменным током коллектора, при этом снимается ток и напряжение коллектора.

В программе Optimizer задаются справочные характеристики I_c от V_{ge} и V_{ce} от I_c , а затем путем варьирования статических параметров снимаемые характеристики приближаются к справочным.

Подбор емкостных параметров при желании также можно осуществлять в этой программе.

Однако особенно ценен Optimizer там, где сложно использовать МС — при уточнении параметров T_f , V_{tf} , X_{tf} , B_f , R_{gg} , L_e по справочным временам задержек и переключения T_{don} , T_r , T_{doff} , T_f , а также энергии включения E_{on} и полной энергии E_{total} . Для этого в другом проекте в модели транзистора указанные параметры задаются варьируемыми. Причем, поскольку произведение $B_f \times K_p = 6.599$, найденное в МС, определяет статические характеристики, уже верно нами настроенные, это произведение

Таблица 3

	Нижний предел	Верхний предел	Начальное значение	Полученное значение
BF	0,1	10	2,352	3,87102
TF	1E-15	1E-03	28,366n	15,3252n
VTF	0,01	100	5	5,98367
XTF	0,01	100	1,5	1,75684
RGG	0,1	30	6,707	5,42093
LE	0,1n	10n	4n	3,32898n

меняться не может. Поэтому в модели МДП-транзистора нужно указать $K_p = 6.599/\{Bf\}$ и менять только параметр Bf . Модель IGBT-транзистора помещается в режим, соответствующий справочному переключению (рис. 2). Снимается осциллограмма тока, по ней фиксируются расчетные значения времен переключения. Кроме того, в проект помещается источник напряжения, пропорциональный произведению тока транзистора и напряжения на нем и подключенный к интегратору, на выходе которого мы имеем напряжение, пропорциональное энергии. Это напряжение снимается при двух моментах времени: после включения транзистора (E_{on}) и в конце периода (E_{total}).

В Optimizer при помощи целевых функций задаются четыре справочных значения времен и два значения энергии, и путем варьирования параметров модели из второй группы расчетные времена и энергии приближаются к справочным. В качестве начальных значений уточняемых параметров берутся параметры, определенные в MS.

Времена переключения и энергии с параметрами, уточненными в Optimizer, приведены в таблице 2. Как видно, относительную среднеквадратичную ошибку удалось уменьшить до 16%.

Таким образом, составная модель IGBT-транзистора, описанная здесь, является более гибкой, чем встроенная модель, в силу большего числа параметров (в статье использовались основные, но не все параметры модели) и может использоваться для моделирования новых типов современных IGBT-транзисторов. Предложенная здесь методика отыскания и уточнения параметров этой составной модели при помощи программ MathCad и Optimizer для моделирования IGBT-транзисторов позволяет получать более достоверные результаты, нежели те, что достигаются при использовании библиотечных параметров или параметров, доступных в Интернете.

Литература

1. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: «Солон». 1999.
2. Колпаков А. Моделирование транзисторов IGBT с помощью PSPICE // Компоненты и технологии. 2002. № 8.
3. Catt J., Chokhawala R., Pelly B. Введение по применению модулей БТИЗ в корпусах 600В, ADD-A-PAK и INT-A-PAK. Силовые полупроводниковые приборы. Книга по применению International Rectifier. AN-988. Пер. с англ. под ред. Токарева В. В. Воронеж. 1995.
4. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATHCAD 7.0 в математике, физике и в Internet // М.: «Нолидж». 1999.