

Определение параметров PSpice моделей МДПТ и БТИЗ

по экспериментальным характеристикам

В статье описаны методики определения параметров модифицированных PSpice моделей мощных МДП-транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором по экспериментальным характеристикам с помощью систем MATHCAD и PSpice Optimizer.

Игорь Недолужко

nedoluzhkoig@mpei.ru

Павел Воронин

voroninpa@mpei.ru

Алексей Лебедев

alexey@netmap.ru

Встроенные в PSpice модели мощных МДП транзисторов (МДПТ) и биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) плохо моделируют характеристики (особенно динамические) этих транзисторов. Поэтому в литературе и на сайтах фирм-изготовителей появились усовершенствованные модели этих транзисторов, которые состоят из нескольких PSpice компонентов (моделей транзисторов, зависимых источников тока и т. д.), они оформляются в виде подсхем. Будем называть эти модели составными (СМ). Численные значения параметров таких моделей, по всей видимости, соответствуют неким индивидуальным экземплярам транзисторов, так как если по этим моделям с помощью PSpice рассчитать характеристики транзисторов, то они обычно существенно отличаются от типовых характеристик, приводимых в справочных данных. Возникает необходимость определения параметров этих моделей. Имеющаяся в системе OrCAD программа PSpice Model Editor (PSME) предназначена для определения параметров встроенных в PSpice моделей и, в общем, не пригодна для определения параметров СМ. В [1] и [2] описаны СМ диодов, МДПТ и БТИЗ, а также методика определения их параметров по справочным данным. При отсутствии таких данных или при необходимости определения параметров каких-то конкретных транзисторов можно воспользоваться их экспериментальными характеристиками.

В настоящей статье приведены характеристики некоторых типов МДПТ и БТИЗ, снятых с применением установки (с цифровым осциллографом), разработанной на кафедре промышленной электроники МЭИ [3]. Описана методика определения параметров СМ транзисторов по этим характеристикам с помощью блока PSpice Optimizer (PSO), входящего в систему Orcad [4].

На рис. 1 показана одна из самых простых структур СМ МДПТ. Составные модели МДПТ различных фирм отличаются, в основном, способом моделирования емкости $C_{gd}(U)$ и обратного диода D1. Некоторые фирмы дополняют схему паразитными индуктивностями выводов (порядка 5–7 нН).

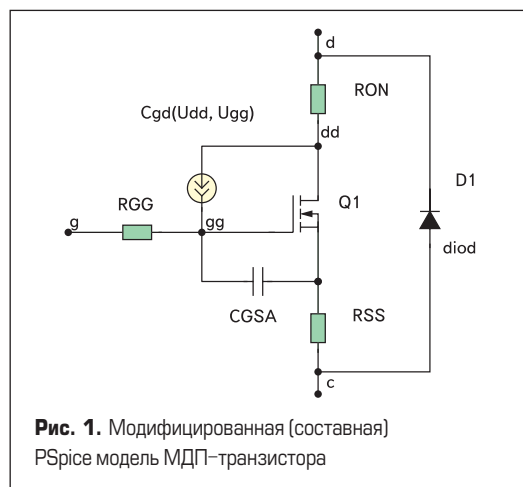


Рис. 1. Модифицированная (составная) PSpice модель МДП-транзистора

В качестве примера рассмотрим определение параметров СМ МДПТ типа BUZ91A ($I_{d_max} = 8$ А, $U_{ds_max} = 600$ В). Его СМ имеется на сайте фирмы Siemens. В этой СМ зависимость $C_{gd}(U)$ моделируется двумя емкостями: постоянной (при $U_{dg} < 0$) и барьерной емкостью диода $C(U_{dg})$ при $U_{dg} > 0$. Переключение с одной емкости на другую осуществляется ключами с нулевым порогом переключения. Зависимость $C_{gd}(U)$ получается разрывной, что может приводить к несходимости процесса расчета. В новых версиях OrCAD появилась функция дифференцирования переменной по времени DDT, применение которой позволяет упростить моделирование $C_{gd}(U)$ с помощью зависимого источника тока (рис. 1) Gcgd:

```
value={{(if ( v(dd,gg)>Vx,CGDO/(1+v(dd,gg)/VJGD)**MGD), CGDX)*DDT(v(dd,gg))}}
```

Здесь Vx определяется из равенства $C_{gd}(Vx) = CGDX$. Обычно по умолчанию берется $VJGD = 0,75$, тогда Vx меньше 0,75 и приближенно можно взять $Vx = 0$ (как в СМ Siemens). Недостаток аппроксимации с применением DDT заключается в трудности задания точных начальных условий, что приводит к ошибкам в начале первого периода переходного процесса. Внутренний МДПТ (на схеме — Q1) вме-

сте с R_{on} и R_{ss} моделирует статические характеристики СМ в нормальном включении. Если задать, например, $L = 1 \mu$ и $W = 2 \mu$, то Q1 описывается всего двумя параметрами — K_P и V_{TO} . Обратный диод описывает ВАХ СМ в инверсном включении и нелинейную емкость сток–исток. Точное моделирование МДПТ в инверсном включении важно только в схемах синхронного выпрямления, поэтому специально параметры модели диода определять не будем и воспользуемся для него моделью Siemens: $ISO = 0.3$ n, $BV = 600$, $RS = 0.05$, $CJO = 0.6$ n, $TT = 0.5$ u.

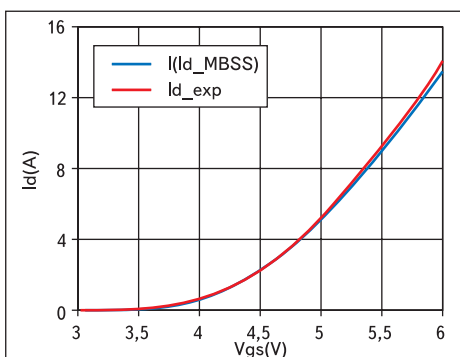


Рис. 2. Стоко–затворные ВАХ BUZ91A (I_{d_MESS} — датчик тока в расчете, I_{d_exp} — ток в эксперименте)

Таким образом, для СМ данного транзистора нужно определить статические параметры K_P , V_{TO} , R_{ON} и R_{SS} и динамические R_{GG} , $CGDX$, $CGSA$, $CGDO$, MGD и $VJGD$. Для определения статических параметров необходимы экспериментальные статические ВАХ: стоко–затворная для активной (пологой) области и выходная для области насыщения (крутой).

Все характеристики снимались в импульсном режиме для предотвращения перегрева транзисторов. На рис. 2 приведены стоко–затворные характеристики МДП транзистора типа BUZ91A, снятые при $U_{ds} = 50$ В, а на рис. 3 и 4 — осциллограммы напряжений сток–исток и затвор–исток при включении и выключении транзистора в схеме ключа с резистивной нагрузкой ($V_{dd} = 105$ В, $R_d = 11$ Ohm, $V_g = 15$ В, $R_g = 10$ Ohm, времена нарастания и спада V_g около 10 нс). Выбор схемы с резистивной нагрузкой обусловлен ее простотой и меньшим влиянием паразитной индуктив-

ности (по сравнению, например, с работой на токовую нагрузку).

Обозначения «ex» соответствуют экспериментальным характеристикам, «ps» — результаты расчета на PSpice (см. далее), «ps_INF» — результаты расчета на PSpice по модели Siemens.

При расчетах учитывались полные паразитные индуктивности (индуктивности выводов и монтажа) не более $L_g = 7$ нН, $L_d = 60$ нН, $L_s = 10$ нН. Видно, что экспериментальные характеристики существенно отличаются от расчетных по СМ Siemens (Infineon).

Для определения статических параметров СМ воспользуемся экспериментальной проходной ВАХ (рис. 2) и одной точкой переходной характеристики (рис. 3) $U_{ds}(9 \text{ A}) = 6,3$ В.

Определить эти параметры можно несколькими способами: с помощью блока PSME [4], в системе MATHCAD [1, 2], в блоке PSO системы Orcad [4].

Здесь применялся третий способ. Результаты представлены в таблице 1, а на рис. 2 показана расчетная характеристика. Наибольший интерес представляет определение динамических параметров с помощью PSpice Optimizer. Сначала в системе MATHCAD аналитически рассчитываются начальные приближения. Начальное приближение параметра R_{GG} рассчитывается по разности напряжений плато (полочки) затворного напряжения на этапах включения и выключения $R_{GG} = 1,2$ Ohm:

$$R_{GG} = \Delta U \frac{R_{gs}}{(V_g - \Delta U)}$$

В начале включения (до полочки) напряжение на затворе нарастает экспоненциально (если не учитывать индуктивность затвора):

$$U_g(t) = \frac{V_g}{R_{gs} + R_{GG}} \left[R_{GG} + R_{gs} \left[1 - \exp \left[\frac{-t}{(R_{GG} + R_{gs})CGSA} \right] \right] \right]$$

Отсюда в системе MATHCAD в блоке given-интег с использованием приведенной зави-

симости находится $CGSA = 1,48$ н. На этапе включения после полочки напряжение на затворе нарастает также экспоненциально, но уже с другой постоянной времени.

$$U_{g_on}(t) := U_p \times \exp \left[\frac{-t}{(R_{gg} + R_{gs})(C_{gsa} + C_{gdx})} \right] + V_g \left[1 - \exp \left[\frac{-t}{(R_{gg} + R_{gs})(C_{gsa} + C_{gdx})} \right] \right]$$

Отсюда находится $CGDX = 6,3$ н. Начальные приближения для $CGDO$, MGD и $VJGD$ можно взять из СМ Siemens: $CJO = 0,458$ н; $M = 0,579$; $VJ = 1,035$.

Параметры в PSO отыскиваются по нескольким точкам экспериментальных осциллограмм тока и потенциала затвора при включении и выключении таким образом, чтобы расчетные осциллограммы совпадали с экспериментальными. Для этих целей общий массив показаний, записанных цифровым осциллографом, объемом в десять тысяч точек прореживается любыми средствами до десяти–пятнадцати точек. В среде Orcad моделируется схема эксперимента, вызывается программа PSO и вводятся внешние спецификации с использованием этих прореженных данных. В строке EVALUATE спецификации были заданы для напряжения на затворе функция $yatx(v(gs),!)$, а для тока функция $yatx(I(Id_mess),!)$, где vgs — потенциал затвора транзистора в расчетной схеме, Id_mess — нулевой ЭДС, выполняющий функцию датчика тока стока. Также надо учитывать, что время начала моделируемых процессов в схеме должно совпадать с временем экспериментальных процессов, записанных осциллографом, и при необходимости ввести соответствующее смещение. После старта программа PSO начнет автоматически варьировать искомые параметры модели, пытаясь подогнать расчетные формы напряжения и тока под заданные ей во внешних спецификациях. В качестве начальных условий для BUZ91 были взяты значения, определенные в MC: $R_{GG} = 1,022$;

Таблица 1. Параметры СМ BUZ91A, определенные в PSO

Параметр	K_P	R_{ON}	V_{TO}	$CGDX$	R_{GG}	$CGSA$	$CGDO$	$VJGD$	MGD
Значение	2,04	0,7	3,4	6,42н	1,24	1,48н	1,127н	0,746	0,835

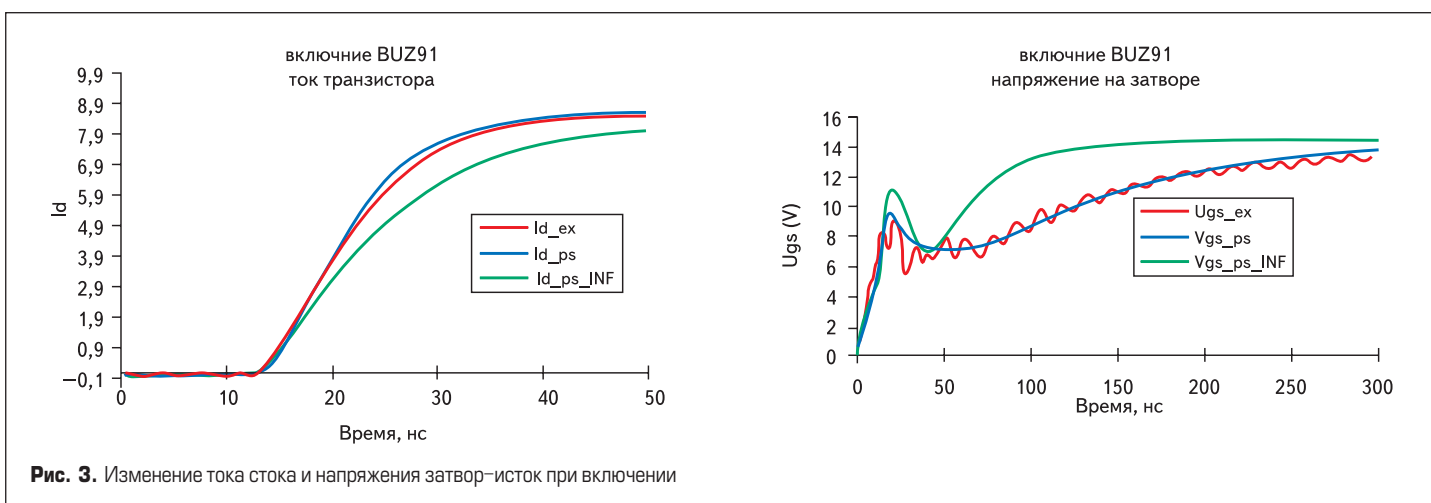


Рис. 3. Изменение тока стока и напряжения затвор–исток при включении

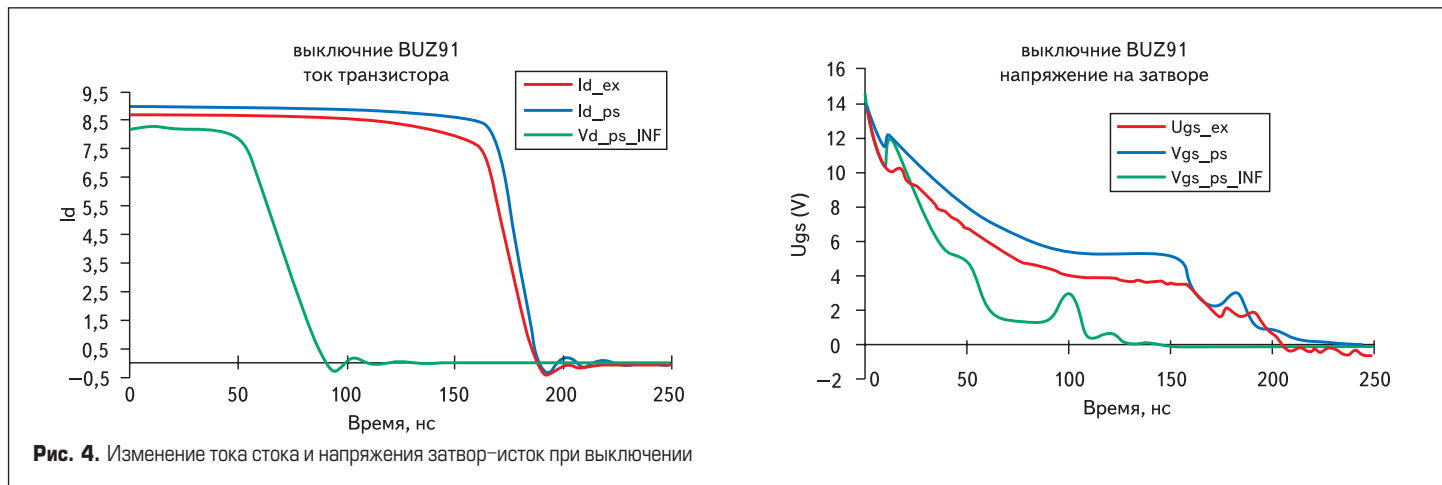


Таблица 2. Результаты моделирования и эксперимента с транзистором BUZ91A

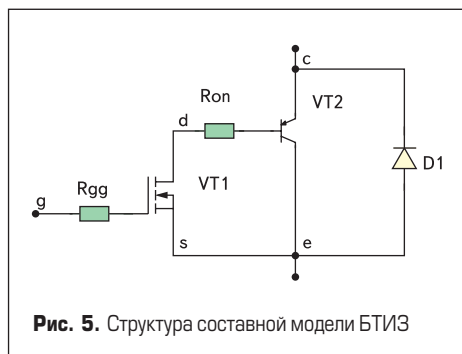
	Id	t _{don} (ns)	t _r (ns)	t _{doff} (ns)	t _f (ns)	СКО %
Моделирование на PSpice	2	13	7	194	21	9
Эксперимент	2	14	8	188	19	
Моделирование на PSpice	8,68	14	18	156	19	19
Эксперимент	8,68	15	18	156	30	

CGSA = 4,449н; CGDX = 5,397н; VJGD = 1; CGDO = 1н; MGD = 0,5.

Значения параметров, полученные при оптимизации, приведены в таблице 1, а на рис. 3 и 4 показаны характеристики, рассчитанные в PSpice с этими параметрами.

В таблице 2 приведены результаты эксперимента и расчета для двух значений тока стока (сопротивления R_d). Видно, что ошибки расчета достаточно малы.

Заметим, что при подстановке параметров из таблицы 1 в CM Siemens результаты расчетов по этой модели практически полностью совпадают с результатами расчетов по рассмотренной модели.

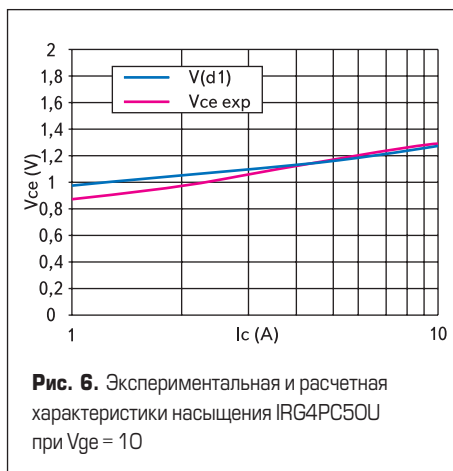


Теперь применим описанную выше методику для определения CM БТИЗ по экспериментальным характеристикам на примере транзистора типа IRG4PC50U. CM БТИЗ и методика определения ее параметров по справочным характеристикам рассмотрены в [2].

На рис. 5 показана структура CM БТИЗ.

Структура VT1 такая же, как и рассмотренная ранее на рис. 1 (без обратного диода D1).

Помимо параметров модели МДПТ, рассмотренных ранее, здесь нужно определить параметры биполярного транзистора, который при



нормальном включении БТИЗ может находиться или в отсечке, или в активной нормальной области работы. Для определения параметров CM необходимо, как и для МДПТ, снять статические ВАХ — проходную в активной области и выходную в области насыщения (рис. 6 и 7), а также осциллограммы напряжений на коллекторе и затворе (рис. 8 и 9) в схеме ключа с резистивной нагрузкой (V_{ge} = 15 В; R_g = 10 Ом; V_d = 105 В; R_c = 11 Ом). В отличие от справочного режима измерения на токовую нагрузку схема с резистивной нагрузкой была выбрана для определения параметров в силу меньшего влияния паразитной индуктивности.

В начале расчета нужно определить начальные приближения для всех параметров. Параметры RGG, CGDX, CGSA определяются так же, как описано для МДПТ. RGG = 1,022, CGSA = 4,449н, CGDX = 5,397н.

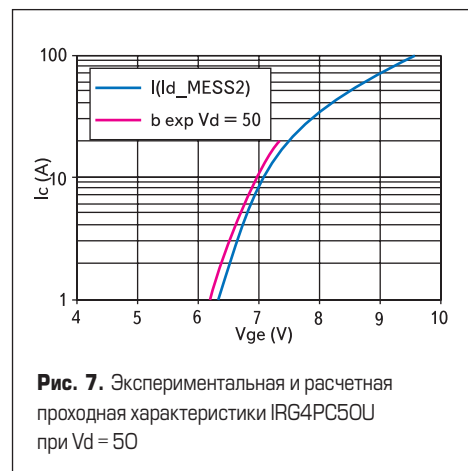
Спад тока коллектора после выключения внутреннего МДПТ происходит экспоненциально с постоянной времени BF*TF и описывается формулой:

$$I(t) := \frac{BF \times Ic}{1 + BF} \exp\left(\frac{-t}{BF \times TF}\right).$$

Отсюда по скачку тока можно найти BF = 0,815, а по нескольким точкам «хвоста» осциллограммы тока вычислить TF = 302н.

Таблица 3. Параметры CM IRG4PC50U, определенные в PSO

CGSA	TF	BF	CGDX	RGG	IS	KP	BF	RON	NF	VTO	CGDO	MGD	VJGD
4,78н	264н	0,896	5,2н	1,15	17,6н	4,67	0,896	0,033	1,99	5,005	4,16н	1,66	3,03



На сайте фирмы International Rectifier (www.irf.com) имеется CM этого транзистора, здесь можно взять параметры обратного диода IS = 6,56н, RS = 0,023, N = 2, XTI = 0,5, BV = 600, IBV = 0,00025, CJO = 11,6н, VJ = 1,5, M = 0,64, TT = 17,5н.

Начальные приближения CGDO, VJ, MJ определяются в MATHCAD по справочной характеристике Crss(U): CGDO = 4,16н, MGD = 1,66, VJGD = 3,03.

Статические параметры IS, NF, RON, Beta, VTO определяются в MATHCAD в блоке given-minerrt с использованием зависимостей [2] с учетом найденного параметра BF:

$$Uce(I, Is, Nf, Ron, Bf, Beta, Vto) := \\ := \left[Ron + \frac{1}{2Beta(Vgs - Vto)} \right] \frac{I}{Bf + 1} + \\ + VtNf \ln\left(1 + \frac{I}{Is}\right),$$

$$Ic(U, Beta, Vto, Bf) := \\ := Beta(Bf + 1)(U - Vto)^2.$$

Для IRG4PC50U найдены следующие начальные приближения параметров IS = 1,756E-8, NF = 1,993, RON = 0,033, Beta = 4,669, VTO = 5,015 (при L = 1u и W = 2u, Kp = Beta).

Далее эти параметры уточняются в PSO по методике, описанной ранее для МДПТ.

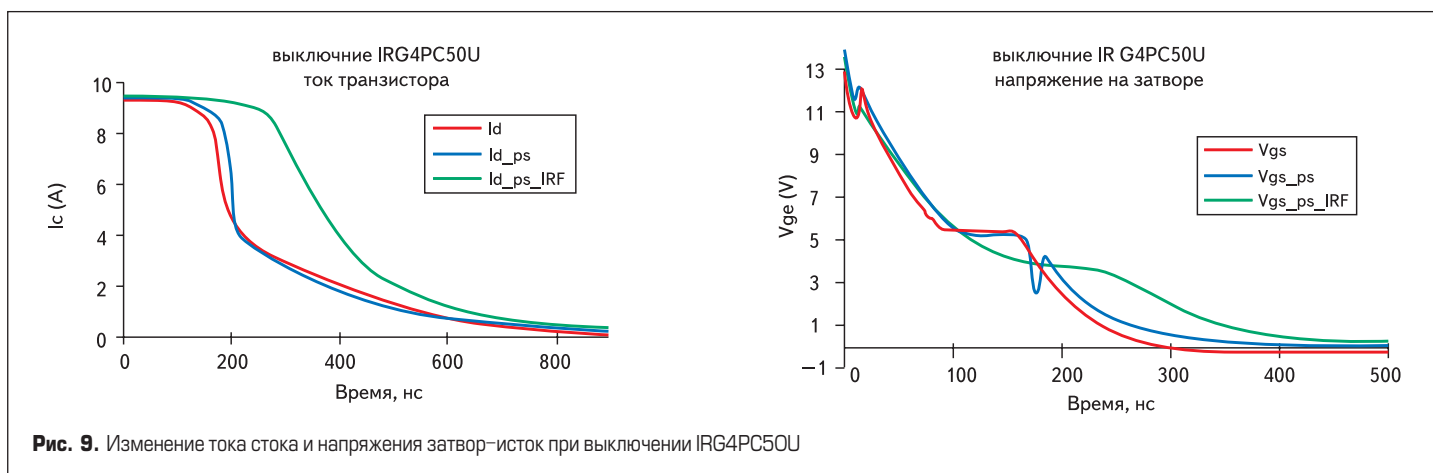
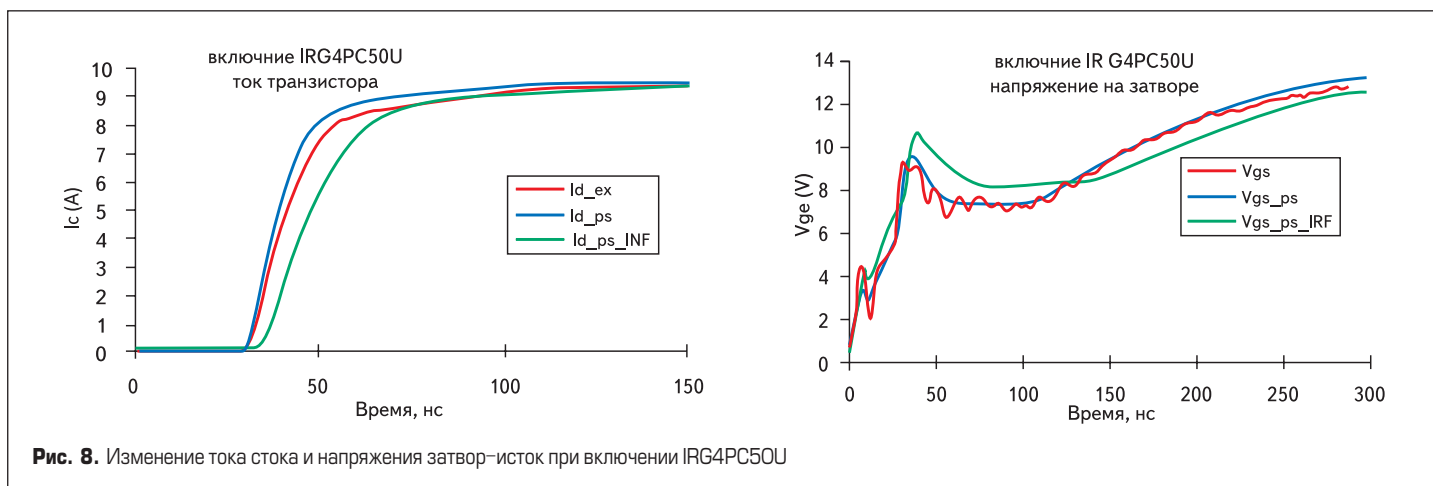


Таблица 4. Результаты моделирования и эксперимента с транзистором IRG4PC50U

	Id	tdon (ns)	tr (ns)	tdoff (ns)	tf (ns)	CKO %
Моделирование на Pspice	2	31	11	167	359	14
Эксперимент	2	30	14	175	427	
Моделирование на Pspice	9,4	32	23	180	378	14
Эксперимент	9,4	33	30	161	403	

Значения параметров, полученные при оптимизации, приведены в таблице 3, а на рис. 8 и 9 показаны характеристики, рассчитанные в PSpice с этими параметрами. Как видно, расчетные осциллограммы в достаточной степени совпадают с экспериментальными.

В таблице 4 приведены результаты эксперимента и расчета для двух значений тока стока (сопротивления R_d).

Таким образом, предложенная здесь методика отыскания параметров составных моделей МДПТ и БТИЗ по экспериментальным данным позволяет достаточно точно моделировать процессы переключения как для данного, так и для других режимов работы. Характеристики переключения транзисторов, которые использовались в эксперименте, заметно отличаются от характеристик переключения, рассчитанных по составным моделям фирм производителей.

Заметим, что как и в PSpice, встречающиеся в тексте имена параметров моделей, например CGSA или Cgsa, равнозначны.

Литература

1. Лебедев. А. Г., Недолужко И. Г. Усовершенствованные PSpice модели мощных диодов и МДП-транзисторов и определение их параметров // Практическая силовая электроника. 2003. № 11. МПМ-Ирбис.
2. Лебедев А. Г., Недолужко И. Г. Методика определения параметров PSpice моделей IGBT-транзисторов // Силовая Электроника. 2005. № 2.
3. Воронин П. А., Щепкин. Н. П. Устройство контроля параметров силовых транзисторов // Практическая силовая электроника. 2003. № 11. МПМ-Ирбис.
4. Разевиг В. Д. Система проектирования Orcad 9.2. М.: Солон-Р, 2001.