

Опыт моделирования систем силовой электроники

в среде OrCAD 9.2

Среда моделирования OrCAD 9.2 является мощным средством исследования электронных систем и, в частности, систем силовой электроники, опытом моделирования которых хотели бы поделиться авторы в данной статье.

Юрий Болотовский

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы

g_thanazly@mail.ru

Среда OrCAD 9.2 (а конкретно, входящая в нее программа PSpice Model Editor) имеет в своем составе 11 стандартных шаблонов элементов [1]:

- 1) Диод (Diode);
- 2) Биполярный транзистор (Bipolar Transistor);
- 3) Магнитный сердечник (Magnetic Core);
- 4) IGBT-транзистор (Ins Gate Bipolar Tran);
- 5) JFET (Junction FET);
- 6) Операционный усилитель (Operational Amplifier);
- 7) MOSFET (MOSFET);
- 8) Компаратор (Voltage Comparator);
- 9) Стабилизатор напряжения (Voltage Reference);
- 10) Регулятор напряжения (Voltage Regulator);

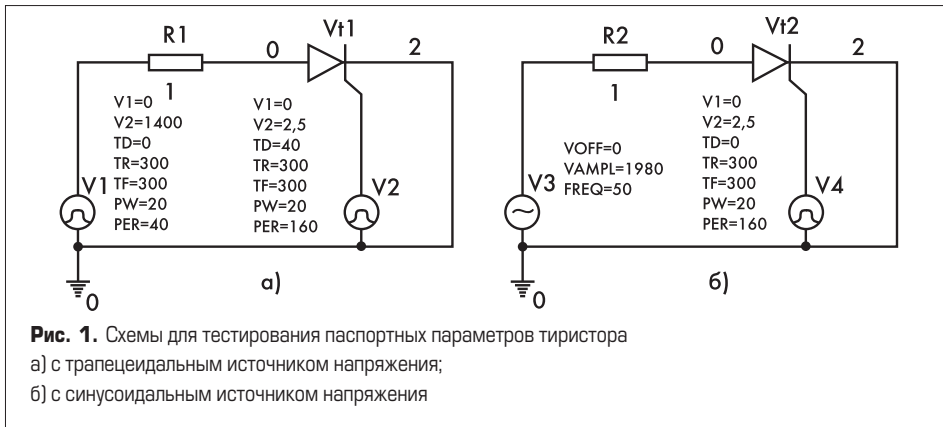
11) Транзистор Дарлингтона (Darlington Transistor).

Получение модели конкретного устройства на основании вышеперечисленных шаблонов требует введения в шаблон стандартного перечня параметров и характеристик моделируемого устройства, часть из которых может не являться паспортной. В случае если значение параметра неизвестно, шаблон предлагает использовать значение этого параметра по умолчанию, что, вообще говоря, требует подтверждения достоверности сформированной модели.

Все прочие виды элементов приходится описывать в виде подсхем (.SUBCKT), что требует дополнительной работы по их подготовке.

Таблица 1. Параметры PSPICE-модели тиристора ТБ-143-630-14 и ее тестирование

Наименование параметра	Обозначение (* – входные параметры для PSpice-модели)	Паспортное значение параметра	Условия экспериментального измерения параметра	Величина параметра, полученная на PSpice-модели
Неповторяющееся импульсное напряжение в открытом состоянии, В	U_{DSM}	1500	PW VSIN = 10 мс	1493
Неповторяющееся импульсное обратное напряжение, В	U_{RSM}	1500	PW VSIN = 10 мс	1493
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, В	U_{DRM}^*	1400	PW VSIN = 10 мс	1400
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	U_{RRM}^*	1400	PW VSIN = 10 мс	1400
Средний ток в открытом состоянии, А, не более	I_{TAV}	630	PW ISIN = 10 мс	–
Ударный ток в открытом состоянии, кА, не более	I_{TSM}	10,5	PW ISIN = 10 мс	–
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии, А/мкс, не более	di/dt	1000	$U_D = 0,67U_{DRM}$	–
Импульсное напряжение в открытом состоянии, В, не более	U_{TM}^*	2	$I_{TM} = 1980 A^*$	2,12
Пороговое напряжение в открытом состоянии, В, не более	U_T	1		0,75
Повторяющийся импульсный обратный ток, mA, не более	I_{RRM}	70	$U_R = U_{RRM}$	15
Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии, mA	I_{DRM}^*	70	$U_D = U_{DRM}$	15
Отпирающий постоянный ток управления, mA, не более	I_{GT}^*	320	$U_D = 12 B$	320
Отпирающее постоянное напряжение управления, В, не более	U_{GT}^*	2,5	$U_D = 12 B$	2,5
Неотпирающее постоянное напряжение управления, В, не более	U_{GD}	0,25	$U_D = 0,67U_{DRM}$	0,27
Время включения, мкс	T_{on}^*	3,2	$U_D = 0,67U_{DRM}$	Исх.
Время выключения, мкс	T_{off}^*	32	$U_D = 0,67U_{DRM}$	Исх.
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс, не менее	du_D/dt^*	1000	$U_D = 0,67U_{DRM}$	1000
Ток удержания, mA, не более	I_H^*	500	$U_D = 12 B$	420



В случае если имеются фирменные модели силовых устройств (например, богатая, но, к сожалению, не полная библиотека таких моделей для выпускаемой продукции предоставляется фирмой International Rectifier, www.irf.com), процесс моделирования систем с этими силовыми устройствами существенно упрощается. Еще одним способом получения моделей силовых элементов является использование списков их аналогов, модели которых доступны. Однако во многих случаях (особенно для отечественных силовых элементов) такие модели отсутствуют, что вызывает необходимость построения моделей пользователем.

Моделирование силовых тиристоров

В среде OrCAD 9.2 в библиотеке thyristor.lib, в которой приводится перечень тиристоров фирмы Motorola, в файле SCR дана модель тиристора, обращение к которой представляется следующим образом:

```
.subckt SCR anode gate cathode PARAMS
VDRM VRRM IDRM IH dvdt IGT VGT VTM ITM TON TOFF
```

Смысл входных параметров модели приведен в таблице 1.

Однако в файле SCR представлена и схема модели тиристора (на языке PSpice), в которую входит значительное количество элементов, обладающих своими параметрами, связь которых с паспортными данными моделируемого тиристора не приводится. В связи с этим требуется тестирование полученной модели.

Ниже на примере тиристора ТБ-143-630-14 [2] проведено тестирование PSpice-модели по его паспортным данным. Условия тестирования (табл. 1) воспроизводились с помощью программы PSpice на схемах, приведенных на рис. 1.

На рис. 1а дана тестовая схема для проверки следующих параметров: I_H , I_{GT} , I_{DRM} , I_{RRM} , I_T , du_d/dt . В этом случае схема запитана от источника трапецидальных импульсов напряжения. Для проверки I_H , I_{GT} , I_T подается напряжение 12 В, I_{DRM} и I_{RRM} — 1400 В. При проверке du_d/dt подается напряжение $U_D = 0,67 \times 1400 = 938$ В и изменяется крутизна фронтов TR и TF (см. параметры источника VPULSE на рис. 1а).

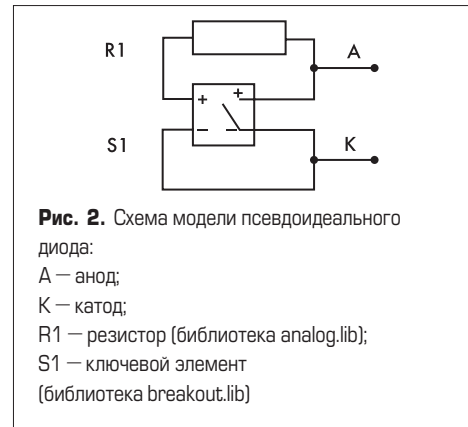
На рис. 1б приведена тестовая схема для проверки следующих параметров: U_{DRM} , U_{RRM} , U_{DSM} , U_{RSM} , U_{TM} . В этом случае схема запитана от синусоидального источника напряжения с частотой 50 Гц и амплитудой 1400 В.

Таким образом, полученная модель соответствует паспортным параметрам, которые определяют заводом-изготовителем. Вопрос о достоверности модели в режимах, отличных от паспортных, точно так же, как и для самого тиристора ТБ143-630-14, является открытым и требует дополнительного тестирования, для чего необходимо рассмотрение его характеристик в реально работающей схеме.

Рассматриваемая модель тиристора адекватно описывает паспортные параметры, за исключением параметров, определяющихся тепловыми потерями. Она тестировалась также при анализе электромагнитных процессов в схемах автономных инверторов для индукционного нагрева металла и показала хорошее соответствие экспериментальным данным.

Таким образом, предлагается следующая методика построения моделей силовых тиристоров:

1. В файл SCR библиотеки thyristr.lib вводятся 10 паспортных параметров тиристора, перечисленных выше.
2. Разрабатываются схемы, позволяющие произвести тестирование модели на соответствие паспортным параметрам.
3. В случае если разработанная модель соответствует паспортным параметрам, она считается адекватной тиристорам.
4. Достоверность работы модели на режимах, отличных от паспортных, требует дополнительных исследований (точно так же, как сам тиристор, при его эксплуатации в режимах, отличных от паспортных, нуж-



дается в соответствующих экспериментальных проверках).

Моделирование силовых диодов

В соответствии с приведенным выше списком шаблонов элементов и программой PSpice Model Editor, входящей в состав среды OrCAD 9.2, модель диода может быть построена двумя способами: введением в шаблон стандартных параметров модели или применением PSpice Model Editor, для чего требуется введение по точкам ряда характеристик [3, 4]. И тот, и другой способ требуют для построения модели введения информации, не содержащейся в стандартном паспорте на силовой диод, что существенно усложняет разработку модели.

Авторами была предпринята попытка построения модели диода ДЧ143-800-20 с использованием стандартного шаблона. Ряд параметров модели и параметры диода были любезно предоставлены сотрудником ВЭИ А. М. Сурьмой. Остальные параметры (A_f — показатель степени в формуле фликкер-шума, I_{sr} — параметр тока рекомбинации, K_f — коэффициент фликкер-шума) взяты по умолчанию [3]. Модель выглядит следующим образом:

```
model DCH143-800-20 D(Is=10e-12 Rs=2.5e-4 Ikf=12500 N=1
Xti=3 Eg=1.11 Cjo=2e-8 M=0.5 Vj=0.8 Fc=0.5 Isr=0 Nr=2 Tt=3e-7
Af=1 Bv=2200 Ibv=1e-3 Nbv=1 Nbv1=1 Tbv1=1m Tbv2=0 Tikf=0
Trs1=0 Trs2=0 Kf=0)
*Kuray DC143-800-20 case=1
*02-05-31 rmm
```

Проводилось тестирование этой модели на соответствие паспортным параметрам. В результате тестирования этой модели получено удовлетворительное совпадение с паспортными данными по прямому падению

Питание моделей схем силовых систем от идеального источника постоянного напряжения

При питании схем силовой электроники от идеального источника постоянного напряжения VDC (библиотека source.lib) следует обратить внимание на то, что при работе схемы с прерывистым входным током во время паузы входного тока может наступить режим протекания тока через источник VDC в направлении от плюса к минусу, что может существенно исказить режимы

работы схемы, поскольку реальный силовой выпрямитель, собранный на диодах, работа которого моделируется источником VDC, ток в этом направлении не пропускает. Во избежание погрешностей, связанных с моделированием выпрямителя источником напряжения VDC, при моделировании рекомендуется включать последовательно с источником VDC диод.

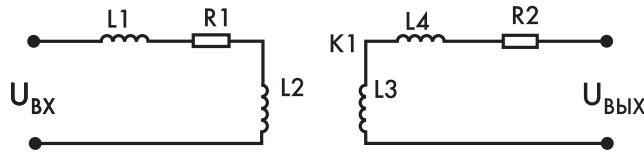


Рис. 3. Модель двухобмоточного трансформатора

напряжения U_{FM} , времени обратного восстановления t_{rr} , а обратная блокирующая характеристика получена с существенными погрешностями.

Таким образом, построение корректных моделей силовых диодов по вышеупомянутым двум способам требует корректного задания большого количества параметров модели или характеристик реальных вентилях, которые практически недоступны без проведения дополнительных исследований.

В некоторых случаях целесообразно использование модели псевдоидеального диода, построенной на базе ключа SBreak (библиотека breakout.lib). Схема модели приведена на рис. 2.

Характерными особенностями данной модели является возможность ее использования на очень больших значениях обратных напряжений и прямых токов. При этом величина обратного напряжения ограничивается значением сопротивления ключа в закрытом состоянии (свойство ROFF), а прямое падение напряжения — сопротивлением ключа в открытом состоянии (свойство RON). Следует учитывать, что для обеспечения устойчивости процесса моделирования разработчиками среды OrCAD 9.2 заложено требование $RON > 0$ и $ROFF < (1/GMIN)$, где GMIN — минимальная проводимость ветви цепи (задается во вкладке OPTIONS раздела Simulation Settings среды OrCAD 9.2) [3, 4].

По умолчанию $RON = 1 \text{ Ом}$, $ROFF = 10^6 \text{ Ом}$, $GMIN = 10^{12} \text{ См}$.

Данная модель диода успешно использовалась авторами при моделировании систем заряда накопительных емкостей на частотах до 20 кГц и напряжениях до 200 кВ. Следует отметить, что моделей реальных высоковольтных диодных столбов на такие частоты и напряжения авторам обнаружить не удалось.

Моделирование магнитных сердечников и трансформаторов

Для моделирования магнитных сердечников в среде OrCAD 9.2 используется модель магнитного сердечника (библиотека magnetic.lib), предложенная Джилсом и Атертоном (потери в сердечнике не учитываются) [3, 4].

В этой модели используются параметры, определяющие магнитные свойства материала сердечника. Петля гистерезиса строится по следующим значениям:

- 1) $[0, V_r]$; где V_r — остаточная индукция в гауссах;
- 2) $[H_c, 0]$; где H_c — коэрцитивная сила в эрстедах;
- 3) $[H_m, V_m]$; где H_m — напряженность насыщения в эрстедах, V_m — индукция насыщения в гауссах;
- 4) значение начальной магнитной проницаемости (Initial Perm.).

Эти параметры вводятся в таблицу окна Hysteresis Curve. После заполнения таблицы следует выполнить команду Extract Parameters вкладки Tools строки меню PSpice Model Editor. Это обеспечивает вычерчивание предельной петли гистерезиса по параметрам, введенным в таблицу.

Остальные параметры, которые вводятся в модель, определяют геометрические размеры сердечника и вводятся в таблицу окна Parameters:

- 1) площадь поперечного сечения магнитопровода (AREA) в квадратных сантиметрах;
- 2) средняя длина магнитной силовой линии (PATH) в сантиметрах;
- 3) коэффициент заполнения материала сердечника (PACK);
- 4) ширина воздушного зазора (GAP) в сантиметрах.

Модель двухобмоточного трансформатора (рис. 3) строится на основе модели сердечника.

На рис. 3 L2, L3 — первичная и вторичная обмотки трансформатора, задаваемые числами витков (при вызове индуктивности из библиотеки analog.lib ее значение по умолчанию 10 мкГн), L1, L4 — индуктивности рассеяния, R1, R2 — сопротивления обмоток, K1 — модель сердечника. Около ее обозначения указываются наименование модели из библиотеки magnetic.lib и коэффициент связи между обмотками (Coupling). Информация о том, какие индуктивности намотаны на сердечник, указывается в свойстве Edit Properties сердечника путем ввода ее в поля таблицы L1...L6. Максимальное число обмоток на сердечнике — 6. Модели трансформатора с числом об-

Таблица 2. Топологические ограничения и способы их устранения

Топологическое ограничение	Способ устранения
В схеме не должно отсутствовать заземление	Заземление любой точки схемы
Схема не должна включать подсхему (или узел), отделенную только емкостными ветвями и/или ветвями с источниками тока	Введение элемента, не являющегося емкостью и/или источником тока, соединяющего подсхему (или узел) со схемой
Схема не должна включать чисто индуктивный контур или контур, состоящий из индуктивностей и/или источников напряжения	Введение последовательно в контур элемента, не являющегося индуктивностью и/или источником напряжения
Схема не должна содержать элемент с не подсоединенными выводами	Подсоединение всех выводов элемента
Схема не должна состоять из двух потенциально несвязанных подсхем	Потенциальная связь подсхем (если возможно — с помощью заземления)

моток от 3 до 6 выполняются аналогично двухобмоточной.

Модель дросселя выполняется как модель однообмоточного трансформатора.

Среда OrCAD 9.2 позволяет моделировать трансформаторы без сердечника (элемент K_Linear из библиотеки analog.lib). В этом случае обмотки задаются соответствующими значениями их индуктивностей, а коэффициент трансформации определяется как корень квадратный из отношения квадратов значений этих индуктивностей.

При применении моделей трансформатора и дросселя с сердечником, в случае если текущее значение индукции превосходит V_m , могут возникнуть проблемы, связанные с устойчивостью процессов численного интегрирования (Convergence). Если работа в режиме насыщения сердечника не является штатной, при остановке моделирования по ошибке ERROR — Convergence and «time step too small errors» рекомендуется или перевести схему в режим работы без насыщения сердечника, или менять параметры на вкладке OPTIONS окна Simulation Settings и величину Maximum step size на панели Transient options вкладки Analysis окна Simulation Settings (см. ниже).

О топологических ограничениях в схемах

Методы анализа электрических цепей, применяемые в среде OrCAD 9.2 ограничивают класс анализируемых схем. В таблице 2 приведены некоторые топологические ограничения и способы их устранения.

Следует заметить, что тип и номинал вводимого в схему дополнительного элемента должны быть такими, чтобы погрешность, вносимая при этом в работу схемы, была допустимой.

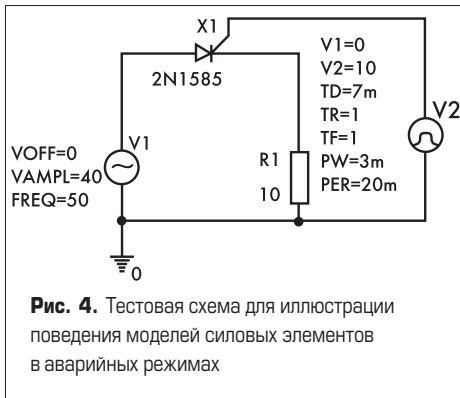
О поведении моделей силовых элементов при авариях

Ряд моделей силовых элементов, применяемых в среде OrCAD 9.2, неадекватно описы-

Биполярный импульсный источник напряжения

В библиотеке source.lib имеется только источник однополярных импульсов напряжения VPULSE и импульсов тока IPULSE. Для реализации биполярных источников тока и напряжения рекомендуется последовательное встречное вклю-

чение источников VPULSE или IPULSE соответственно. При различных сдвигах соответствующих импульсов тока или напряжения во времени можно получить биполярные импульсы сложной формы.



вает поведение элемента в аварийных ситуациях (здесь под аварийной ситуацией будет пониматься режим работы элемента, при котором значения некоторых его параметров, например, ток, напряжение, крутизна нарастания тока, крутизна нарастания напряжения, время, предоставляемое для восстановления запирающих свойств и т. д. превосходят паспортные значения). Неадекватность описания сводится к тому, что реальный вентиль в случае аварийной ситуации выходит из строя необратимо — «сгорает», а модель вентиля может, в случае если параметр возвращается в пределы, допустимые по паспорту, вернуться к нормальному функционированию. В ряде случаев это приводит к тому, что моделируемая схема продолжает функционировать в периодическом режиме, существенно отличающемся от штатного, в то время как реальная установка «сгорает». Часто, если выход за паспортные параметры вентиля происходит только в переходном процессе, заметить это при моделировании достаточно трудно.

На рис. 4–6 приведена тестовая схема и осциллограммы, иллюстрирующие изложенное.

Для тиристора 2N1585 максимально допустимые паспортные прямое и обратное напряжения составляют 50 В. При амплитуде источника питания на схеме (рис. 4) 40 В устройство функционирует в штатном периодическом режиме. Тиристор открывается через 7 мс после начала периода и закрывается отрицательной полуволной тока в 10 мс. К закрытому тиристорному прикладывается напряжение, амплитуда которого составляет 40 В. Соответствующая осциллограмма приведена на рис. 5. При имитации аварийного режима амплитуда напряжения источника питания выбирается 80 В. При этом тиристор отпирается не по импульсу управления, а при достижении прямого напряжения на нем, равного 50 В. Тем не менее аварийный режим, полученный на модели, является периодическим, а моделируемая реальная схема перестает функционировать.

Поскольку количество видов моделей, реализуемых в системе OrCAD 9.2, достаточно велико и поведение их в аварийных режимах различно, рекомендуется при работе с новым типом модели на простейшей схеме (см., например, схему на рис. 4) определить поведение модели в аварийных режимах и в дальнейшем учитывать это при моделировании для исключения возможных ошибок.

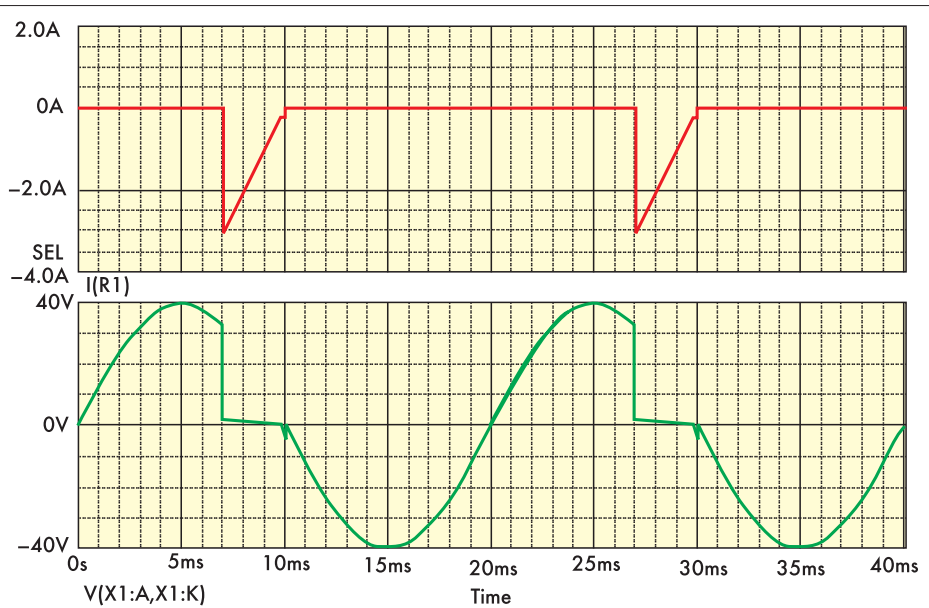


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжений на элементах схемы в штатном режиме

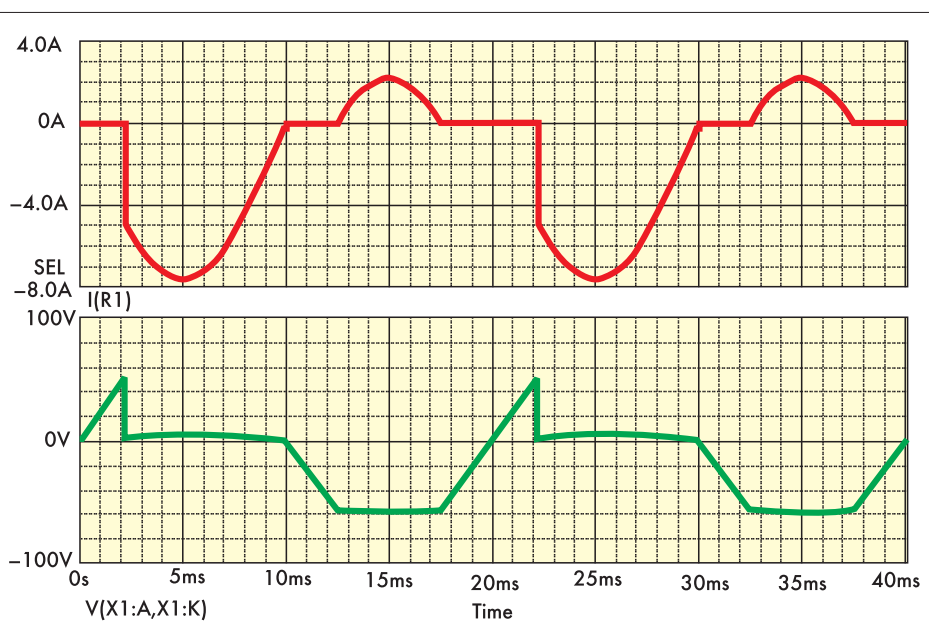


Рис. 6. Осциллограммы токов и напряжений на элементах схемы в аварийном режиме

О вычислении средних и действующих значений токов и напряжений

Очень часто при анализе схем разработчику необходимо знание средних или действующих значений напряжений, токов, мощностей и т. д. Рассмотрим вычисление средних и действующих значений в среде OrCAD на примере синусоидальных токов. По определению:

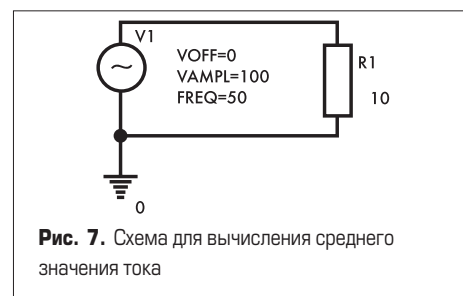
$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}$$

При анализе переходных процессов часто требуется вычисление «текущих» средних и действующих значений и реализуется счет по формулам, где вместо значений периода T

подставляется текущее время (Time). Вообще говоря, в этом случае счет по вышеприведенным формулам дает результат, отличный от действительного. Легко показать, что при увеличении текущего времени Time предел среднего и действующего значения токов сходится к истинному значению при достаточно большом значении величины времени Time.

Пример 1. Рассмотрим вычисление среднего значения величины синусоидального тока для схемы, приведенной на рис. 7.





Для данной схемы амплитуда тока I_m будет равна 10 А, а среднее значение синусоидального тока, как известно, определится как $2/\pi \times I_m$ и будет равно 6,38 А. На осциллограммах (рис. 8) представлены мгновенное значение синусоидального тока и его среднее значение, вычисленное с применением стандартных математических операций среды OrCAD 9.2 как $AVG(ABS(I(R1)))$, равняется 6,43 А (погрешность 0,8% имеет тенденцию к уменьшению при увеличении времени рассмотрения процесса). Закономерности, полученные при вычислении среднего значения, могут быть распространены на действующее значение.

О конвергенции и достоверности получения результатов при моделировании

Одними из самых сложных вопросов, возникающих при моделировании в среде OrCAD 9.2, являются вопросы устойчивости и сходимости численных методов при моделировании и управления этими численными методами с помощью параметров, предоставляемых разработчиками системы OrCAD 9.2 пользователям. Следует отметить, что процесс управления практически не формализован и все инструкции по повышению устойчивости численных методов, приведенные в литературе по среде OrCAD 9.2, носят только рекомендательный характер.

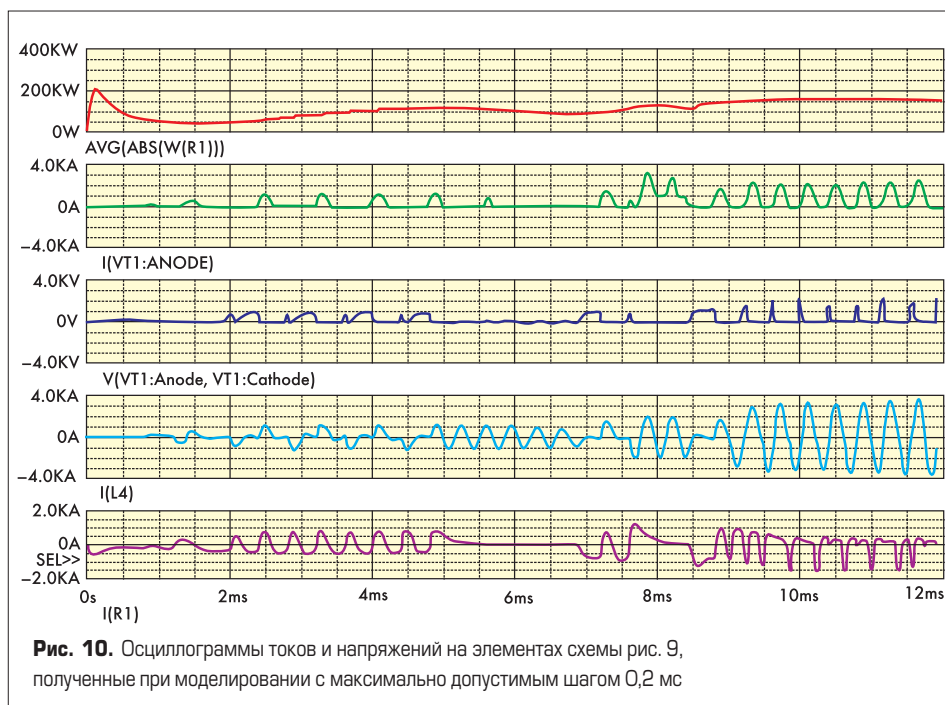
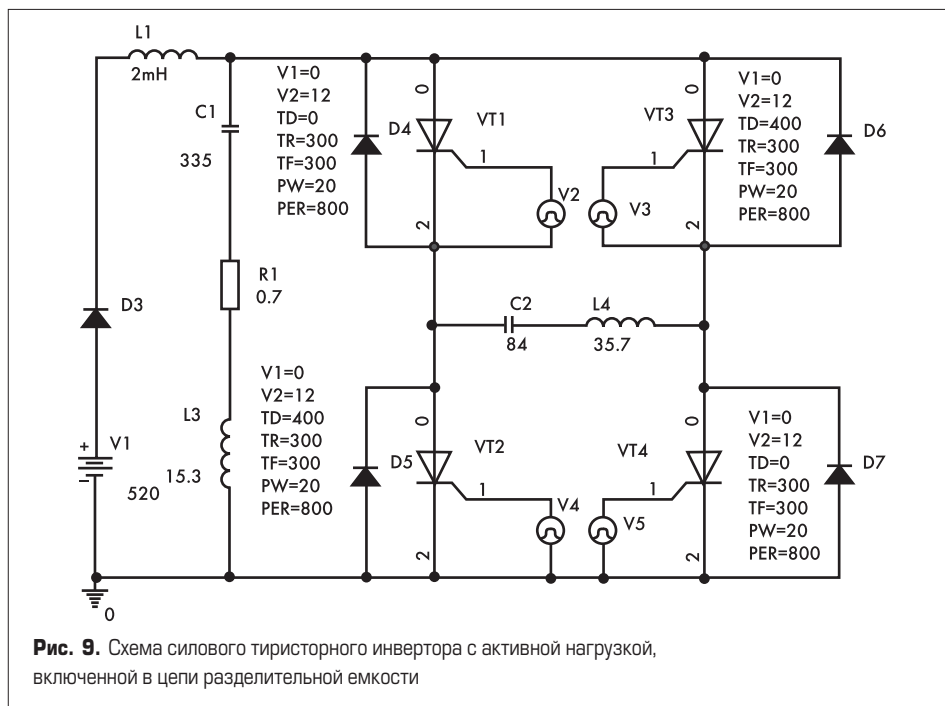
В среде OrCAD 9.2 для управления численными методами при анализе переходных процессов используются следующие параметры (в скобках — значения по умолчанию):

- 1) RELTOL — относительная точность вычисления токов и напряжений (10^{-3});
- 2) VNTOL — абсолютная точность вычисления напряжения (10^{-6});
- 3) ABSTOL — абсолютная точность вычисления тока (10^{-12});
- 4) CHGTOL — абсолютная точность вычисления заряда (10^{-14});
- 5) GMIN — минимальная проводимость ветви электрической цепи (10^{-12});
- 6) ITL4 — максимальное количество итераций на одном временном шаге (10);
- 7) STEP GMIN — включение алгоритма расчета режима по постоянному току вариацией проводимости (выкл.).

Эти параметры вносятся во вкладку Options окна Simulation Settings. Кроме этого, настройка численных методов может осуществляться изменением величины максимального временного шага (Maximum step size), вносимого во вкладку Analysis окна Simulation Settings. По умолчанию значение максимального временного шага равняется 1/50 от конечного времени анализа (TSTOP).

Выскажем следующие соображения, позволяющие уменьшить вероятность появления ошибки ERROR — Convergence and «time step too small errors».

1. Принципиальная схема модели анализируемого устройства должна быть построена таким образом, чтобы избежать в моде-



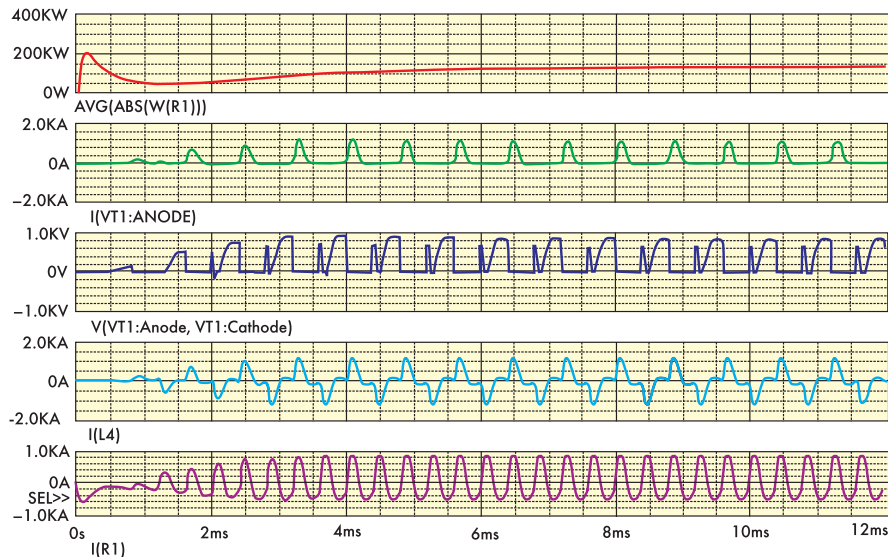


Рис. 11. Осциллограммы токов и напряжений на элементах схемы рис. 9, полученные при моделировании с максимально допустимым шагом 1 мкс

Отображение осциллограммы в требуемом диапазоне по осям

При анализе электромагнитных процессов в схемах тиристорных инверторов с обратными диодами (см., например, схему, приведенную на рис. 9) могут возникнуть некоторые затруднения при попытке определить время, предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств по осциллограмме напряжения на тиристоре. Возможности OrCAD 9.2 позволяют

выбрать нужные масштабы по осям осциллограммы. На рис. 12 приведена осциллограмма (3-я сверху) напряжения на тиристоре, соответствующая таковой на рис. 11 с назначением отображаемого диапазона от -3 до 3 В по оси ординат, из которой легко определяется время, предоставляемое тиристорам для восстановления запирающих свойств.

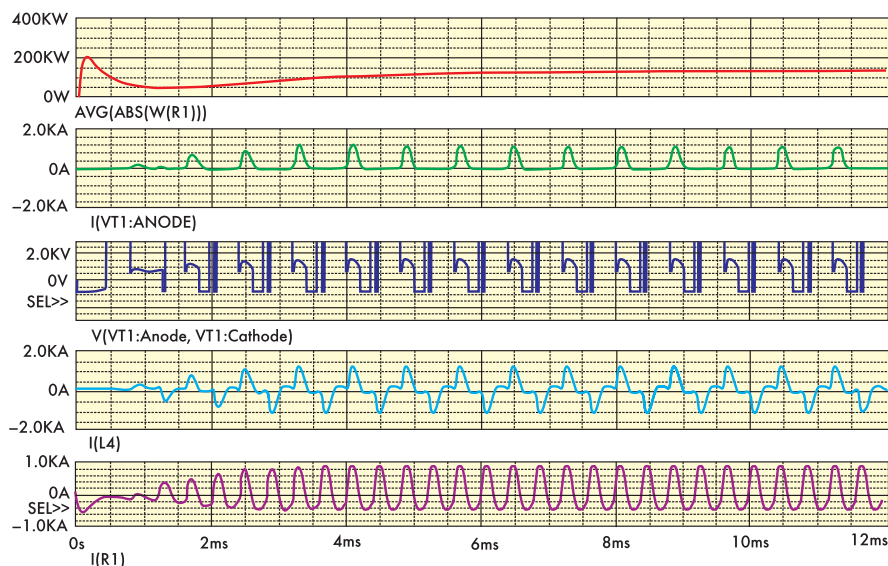


Рис. 12. Осциллограммы токов и напряжений на элементах схемы рис. 9, полученные при моделировании с максимально допустимым шагом 1 мкс (с назначением отображаемого диапазона осциллограммы напряжения на тиристоре от -3 до 3 В)

ли «быстрых процессов» изменения токов и напряжений, не свойственных моделируемой схеме.

2. В системах силовой электроники оперируют с большими значениями токов и напряжений, поэтому использовать точность ABSTOL, VNTOL и CHGTOL, предлагаемую разработчиками по умолчанию, нецелесообразно.

3. Загрубление вышеупомянутых параметров до значений, равных вольтам и амперам недопустимо, так как может привести к большим погрешностям при определении моментов коммутации силовых ключевых элементов (тиристоры, транзисторы и т. д.).

Авторы предлагают следующую эмпирическую процедуру подбора параметров, поз-

воляющих избежать ошибки, связанной с конвергенцией (в порядке их применения в случае возникновения ошибки ERROR — Convergence and «time step too small errors»):

1. Попытка анализа переходного процесса с набором значений перечисленных параметров по умолчанию.
2. Перевод параметра STEPGMIN в режим «Вкл.».
3. Установка параметра ITL4 = 100.
4. Установка параметра ITL4 = 1000.
5. Установка параметров VNTOL = 10^{-3} и ABSTOL = 10^{-3} .
6. Установка параметров CHGTOL = 10^{-8} и GMIN = 10^{-6} .
7. Установка параметра RELTOL = 0,01.
8. Установка параметра RELTOL = 0,0001.
9. Ввод величины максимального временного шага, равной 10^{-6} .
10. Уменьшение величины максимального временного шага на $0,1 \times 10^{-6}$ до величины 10^{-10} (при уменьшении шага растет и может стать недопустимо большим время счета).

Следует отметить, что манипулирование вышеперечисленными параметрами, определяющими численную устойчивость при моделировании, является небезопасным, особенно для существенно нелинейных схем, каковыми являются схемы силовой электроники. Для иллюстрации этого рассмотрим пример 2.

Пример 2. На рис. 9 приведена электрическая принципиальная схема силового тиристорного инвертора с активной нагрузкой, включенной в цепи разделительной емкости. Анализ этой схемы осуществлялся с набором параметров, управляющих численными методами, при моделировании принятыми по умолчанию и величиной максимально допустимого шага 0,2 мс, который назначается по умолчанию при TSTOP = 30 мс (рис. 10) и 1 мкс (рис. 11).

Из осциллограмм на рис. 10 следует, что пуск схемы инвертора является неустойчивым и приводит к срыву инвертирования (ошибочное заключение). Из осциллограмм на рис. 11 следует, что пуск схемы с указанными параметрами является устойчивым, что подтверждается упрощенными аналитическими расчетами и экспериментальными данными.

Приведенный пример 2 демонстрирует необходимость критического подхода к полученным при моделировании схем силовой электроники результатам.

Литература

1. PSpice User's Guide. Oregon. Cadence PCB System Division. 2000.
2. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Имитационная модель «Быстродействующий тиристор ТБ143-630-14». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003610933. 2003.
3. PSpice Reference Guide. Oregon. Cadence PCB System Division. 2000.
4. Раевич В. Д., Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р. 2001.