

# Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2

## Часть II

Статья «Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2», опубликованная в первом номере «Силовой Электроники», заканчивалась разделом «О конвергенции и достоверности получения результатов при моделировании». Предлагаемый вниманию читателя новый материал продолжит эту тему.

**Юрий Болотовский**

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы**

g\_thanazly@mail.ru

### О конвергенции и достоверности получения результатов при моделировании

Среди причин, которые могут вызывать конвергенцию, выделяются следующие:

- отсутствие сходимости при вычислении начального приближения, определяемого для проведения анализа по постоянному току и анализа переходных процессов;
- неустойчивость вычислительного процесса, связанная с величиной максимального и минимального допустимых шагов интегрирования.

Необходимо учитывать следующие ограничения, накладываемые конечной динамической разрядной сеткой и, следовательно, конечной точностью вычислений:

- напряжения и токи ограничены величиной  $\pm 10^{10}$  вольт и ампер;
- производные переменных ограничены величиной  $10^{14}$ ;
- использование арифметики двойной точности обеспечивает получение 15 достоверных знаков. Рассмотрим эти причины подробнее.

#### Сходимость при вычислении начального приближения

Для вычисления начального приближения по постоянному току и проведения анализа переходного процесса для аналоговых устройств в PSpice решается система нелинейных уравнений, которые описывают поведение схемы по постоянному току. При этом используется итерационный метод Ньютона — Рафсона, который запускается при наличии некоторого первого начального приближения и осуществляет итерационное улучшение решения до удовлетворительной сходимости по вычисляемым напряжениям и токам.

Метод Ньютона — Рафсона обладает свойством абсолютной сходимости. Однако эта сходимость может быть достигнута при следующих условиях:

- система нелинейных уравнений должна иметь решение;
- уравнения должны быть непрерывны;
- уравнения должны быть дифференцируемы;
- начальное приближение должно быть достаточно близко к решению.

Для успешного нахождения решения требуется совместное выполнение этих условий.

Основная трудность при предварительном анализе схемы заключается в том, что соответствие нелинейной системы уравнений вышеперечисленным условиям определить по топологии схемы и параметрам ее элементов очень сложно.

Однако при этом принимается во внимание:

- Подавляющее большинство реально работающих схем при анализе начального приближения описываются системой нелинейных уравнений, имеющих решение.
- Уравнения, которые формируются и решаются в PSpice, непрерывны. Функции, реализуемые при имитационном моделировании также непрерывны. Таким образом, для реальных физических цепей уравнения являются непрерывными.
- Практически условие дифференцируемости выполняется в случае, если изменения токов и напряжений на элементах происходят с крутизной, не превышающей приведенное на производные ограничение ( $10^{14}$ ). Во время предварительного анализа модели необходимо оценивать значения производных токов и напряжений и, в случае необходимости, осуществлять их схемное ограничение.
- Метод Ньютона — Рафсона гарантирует сходимость только при достаточно близком начальном приближении. Однако не существует способа, позволяющего определить, достаточно ли близко начальное приближение для получения сходимости. В PSpice эта проблема решается на основе непрерывности переменных. Каждая задача анализа начинается с первого приближения. При этом для нахождения следующего приближения применяется

переменный шаг. Если последующее решение не сходится, осуществляется уменьшение размера шага и возврат к первому приближению.

Самая сложная часть процесса анализа — нахождение начального приближения. PSpice на первом этапе анализирует схему с номинальными токами и напряжениями источников питания. При этом нахождение решения не гарантируется, но в большинстве случаев алгоритмы PSpice его находят. В противном случае токи и напряжения источников питания уменьшаются до уровня, близкого к нулю. Влияние нелинейностей не сказывается на работе схемы, то есть цепь становится линейной, и решение может быть найдено всегда (естественно, близкое к нулю). Затем значения токов и напряжений источников питания повышаются до номинальных значений, и используется переменный размер шага интегрирования.

Как только найдено начальное приближение, обеспечивающее сходимость, анализ переходных процессов может быть выполнен. Шаг интегрирования является переменным и автоматически выбирается таким образом, чтобы обеспечить, если это возможно, устойчивое нахождение решения.

#### Анализ по постоянному току

При анализе по постоянному току используются гибридные методы. Первым реализуется алгоритм поиска начального приближения (за счет изменения параметров источников токов и напряжений). Для последующих этапов это приближение используется в качестве исходного. Однако при этом шаг интегрирования не меняется. Если решение не может быть найдено при этом шаге, то алгоритм начального приближения используется для получения результата, реализуемого при данном шаге интегрирования.

Этот процесс является достаточно неэффективным по временным затратам. При этом также требуется, чтобы схема была линейна при малых значениях параметров источников тока и напряжения.

Альтернативным алгоритмом анализа по постоянному току является пошаговое изменение параметра GMIN. По умолчанию этот алгоритм не работает и включается при анализе цепи путем установки флажка STEP GMIN в меню Analysis/Setup/Options (или путем внесения директивы .OPTION STEP GMIN в списке соединений). При включении алгоритма STEP GMIN (он применяется в случае, когда схема не может быть проанализирована при номинальных значениях параметров источников тока и напряжения и если алгоритм также не приводит к результату) параметры источников напряжения и тока уменьшаются до малых значений.

Алгоритм пошагового изменения параметра GMIN для нахождения решения на первом шаге реализуется с большой величиной параметра GMIN. Первоначально эта величина определяется умножением номинального значения GMIN на  $10^{10}$ . Если при этом решение найдено, то GMIN уменьшается в 10 раз и поиск решения повторяется. Это продолжается до тех пор, пока либо GMIN не придет

к номинальному значению, либо не появится конвергенция. В последнем случае GMIN восстанавливается до номинальной величины и начинается процедура снижения параметров тока и напряжения источников.

Как было отмечено выше, PSpice использует алгоритм, который реализует процесс изменения параметров источников питания практически от нуля до номинальных значений. Начальной точкой является значение параметров источников питания, а конечной точкой — номинальное значение. Минимальный размер шага принимается равным  $10^{-6}$  ( $\geq 0,0001\%$  от TSTOP). Первый шаг итераций начинается при нулевом значении всех напряжений.

#### Параметры моделей полупроводниковых и ключевых элементов

При моделировании полупроводниковых приборов в технической документации по PSpice рекомендуется следующее:

- При рассмотрении моделей полупроводниковых приборов необходимо избегать физически нереализуемых параметров.
- Следует исключить моделирование р-п-переходов без последовательно включенного сопротивления.
- Следует избегать ситуаций, при которых идеальный источник обеспечивает протекание тока через обратносмещенный р-п-переход без параллельно включенного сопротивления. Во многих PSpice-моделях, разработанных пользователями, р-п-переходы не имеют почти никакого сопротивления утечки, и это может привести к появлению на переходе напряжения более  $10^{10}$  В, что, как говорилось выше, недопустимо.

Библиотеки моделей, поставляемые с PSpice, построены с учетом этих трех принципов.

Типичной ошибкой разработчиков моделей является задание нереальных параметров элемента. Следующий MOSFET:

```
M1 3, 2, 1, 0 MMOD L=5 W=3
```

характеризуется длиной пять метров и шириной три метра вместо микрометров. Правильное описание такого MOSFET должно выглядеть следующим образом:

```
M1 3, 2, 1, 0 MMOD L=5u W=3u
```

PSpice выдаст ошибку в том случае, если величина L слишком велика, но не сделает этого для мощности, потому что модели MOSFET построены таким образом, что ограничение мощности в них не реализуется. Опция LIST

отражает информацию о мощности, выделяемой в рассматриваемой MOSFET-модели. При перечислении элементов в выходном файле их величины отображаются в экспоненциальном формате, что облегчает запись больших или малых величин.

В PSpice ключи в момент коммутации имеют значения внутренних параметров, существенно превосходящие значения таковых в установленном режиме. При последовательном соединении нескольких ключей суммарное значение этих параметров может обеспечить превышение максимально допустимой величины производной ( $10^{14}$ ). Это может случиться при моделировании простых логических пороговых элементов с использованием идеальных ключей (totem-pole), включенных последовательно. Обычно каскад из двух ключей работает, а из трех или более — уже нет.

#### Анализ переходных процессов

Анализ переходных процессов начинается с использования начального приближения — при этом за начальные условия принимаются значения переменных, полученные при анализе схемы по постоянному току. Эти значения переменных используются как наиболее близкое начальное приближение на каждом шаге интегрирования. В случае необходимости, в процедуре Ньютона — Рафсона при итерации делается шаг назад для нахождения нового момента времени, который обеспечивает лучшее начальное приближение. Величина шага выбирается подходящей для того, чтобы обеспечить вычисление зарядов и токов с необходимой точностью.

Практически первое приближение начальных значений корректируется для получения лучшего варианта и только после этого начинается анализ переходного процесса. Анализ переходных процессов может быть прерван до завершения, если шаг интегрирования становится слишком малым (конвергенция).

Это может создать два различных эффекта:

- метод Ньютона — Рафсона не сходится даже для минимально допустимого размера временного шага;
- существенные изменения в токах и напряжениях схемы происходят за интервал времени меньший, чем минимально допустимый размер шага.

В выходной файл PSpice выдается информация о том, по какой причине произошло прерывание.

### Об анализе переходных процессов с произвольными начальными условиями (токи через индуктивности, напряжения на емкостях)

При анализе переходных процессов в системах силовой электроники у пользователя может возникнуть потребность осуществлять анализ при произвольных, отличных от нуля, значениях токов через индуктивности и напряжений на емкостях схемы. Назначение этих начальных условий производится путем занесения значений токов и напряжений в поле IC свойства Edit Properties соответствующего элемента. Необходимо обра-

тить внимание на то, что если направление ветви и направление протекания тока через индуктивность или напряжения на емкости совпадают, то значение начального условия воспринимается со знаком «+», а в противном случае — со знаком «-». За положительное направление ветви принимается направление от узла с меньшим номером к узлу с большим номером (см. список соединений схемы .LIST).

## О переназначении времени анализа переходного процесса

В некоторых случаях, особенно при моделировании новой схемы, трудно определить время моделирования TSTOP, поскольку характер и длительность переходного процесса заранее неизвестны. Если время TSTOP первоначально установлено неверно и не позволяет получить необходимую о переходном процессе информацию, требуется либо начать моделирование с нулевого момента времени, установив новое значение TSTOP, либо продолжить моделирование с момента остановки, задав необходимые начальные условия и состояния соответствующих нелинейных и/или ключевых элементов, что не всегда просто реализовать. Среда OrCAD 9.2 предоставляет удобную возможность продолжать анализ пере-

ходного процесса до тех пор, пока это необходимо, устанавливая в процессе счета новое значение TSTOP (счет с продолжением).

Для того чтобы реализовать этот режим, необходимо:

- 1) Остановить процесс моделирования с помощью команды «Пауза» из редактора PSpice (выбрать пункт Pause из выпадающего меню Simulation).
  - 2) Внести в диалоговое окно Run For панели инструментов Toolbar новое значение TSTOP.
  - 3) Выйти из режима паузы путем повторного выбора пункта Pause из выпадающего меню Simulation верхней командной строки.
- Данный процесс можно повторять многократно.

Опция SKIPVP при анализе переходных процессов пропускает вычисление начального приближения. В этом случае анализ переходного процесса не имеет исходного начального решения и поэтому не гарантирует схождения в начальной по времени точке. Поэтому использование этой опции не рекомендуется.

Переменная TIME определяет время моделирования переходного процесса и является переменной двойной точности, что обеспечивает точность 15 знаков. Динамический диапазон устанавливается таким образом, что из 15 знаков (переменная TIME) вычитается число знаков, определяемое параметром RELTOL. По умолчанию RELTOL = 0,001 (0,1% или 3 знака), что определяет динамический диапазон TIME как  $15 - 3 = 12$  знаков. Из этого следует, что минимальный временной шаг при интегрировании вычисляется как заданное время счета TSTOP, поделенное на  $10^{12}$ . Таким образом, если в анализируемой схеме за время, меньшее либо равное  $TSTOP/10^{12}$ , происходят существенные изменения переменных, то такая схема практически не может быть проанализирована. Динамический диапазон PSpice достаточно большой, но конечный. Для анализа процессов с быстрыми изменениями переменных рекомендуется уменьшение величины TSTOP.

Если при анализе переходных процессов происходит срыв на первом шаге интегрирования, то обычно причиной этого являются емкость или индуктивность с необоснованно большим значением параметра. Как правило, это следствие опечатки. Рассмотрим следующий пример:

C 1 3, 0 10uf

Ошибка заключается в замене цифры «0» буквой «O», поэтому «Ouf» воспринимается как комментарий. В результате конденсатор получает значение одной фарады, вместо 10 микрофард. Наиболее простой путь выявления ошибок — использование опции LIST (из блока команд .OPTIONS).

Опция LIST передает информацию обо всех элементах схемы в выходной файл. Значения параметров элементов выводятся в экспоненциальном формате.

Это дает возможность легко определить элемент с нереальными параметрами. Такая ситуация не возникает во время анализа начального приближения, потому что конденсаторы и индуктивности при этом исключаются из рассмотрения.

Подобные рассуждения относятся и к паразитным емкостям моделей транзисторов и диодов. Эта информация стандартно отображается в выходном файле (опция NOMOD исключает отображение, но по умолчанию оно включено). В выходной информации опции LIST параметры отображаются в экспоненциальной форме, что облегчает поиск ошибок. Дальнейшая диагностика направлена на то, чтобы уточнить информацию о начальном приближении (опция .TRAN/OP), которая выдает информацию о перечне малосигнальных параметров для каждого полупроводникового элемента, включая расчетные паразитные емкости.

Важно, чтобы время переключения было отличным от нуля. Это гарантируется, если устройство имеет паразитные емкости. Такие емкости имеются в моделях полупроводников в стандартных библиотеках PSpice. Если используются ключи или управляемые источники, то необходимо обеспечить условия, при которых никакие участки цепи не коммутируются за нулевое время (мгновенно). На практике это означает, что если существует любая петля положительной обратной связи (например, триггер Шмитта, встроенный в ключ), то она должна содержать емкость.

Другой способ решения проблемы состоит в том, что уравнения, описывающие переходный процесс, должны быть непрерывны в течение всего времени анализа (а именно, во время вычисления начального приближения уравнения должны быть непрерывны с номинальными параметрами источников питания). При этом следует учитывать, что полное сопротивление конденсаторов понижается при высоких частотах (и малых шагах интегрирования), а полное сопротивление индуктивностей растет. Индуктивности в PSpice имеют неограниченную ширину частотного диапазона.

Реальные индуктивности имеют ограниченную ширину диапазона частот из-за потерь на вихревые токи и поверхностный эффект. На высоких частотах индуктивности падают. Дело в том, что реальные индуктивности характеризуются частотой, при которой их добротность начинает достаточно резко падать. Модели индуктивностей в PSpice не имеют такого ограничения. Это может привести к очень острому пику напряжения, вызванному коммутацией транзистора или диода, подключенного к индуктивности. Острые пики в PSpice, в свою очередь, могут потребовать нереально малого шага интегрирования. Поэтому при работе в среде OrCAD 9.2 рекомендуется параллельно индуктивностям включать резистор (последовательное сопротивление хорошо использовать для моделирования по постоянному току, но оно не расширяет частотный диапазон индуктивности).

Параллельные резисторы дают хорошие модели, учитывающие вихревые токи и ограничение частотного диапазона. Номинал резистора должен устанавливаться таким образом, чтобы полное сопротивление индуктивности, характеризуемое добротностью, начинало спадать на той же частоте, что и у реальной индуктивности.

Для обычной индуктивности с сердечником номиналом 1 мГн Q начинает спадать на частоте не меньшей, чем 100 кГц. Оптимальное значение номинала параллельного резистора определяется как  $R = 2 \times \pi \times 100 \times 10^3 \times 0,001 = 628 \text{ Ом}$ . До частоты, на которой начинается падение Q, доминирует индуктивная составляющая, а выше этой частоты — резистивная составляющая. Это позволяет избежать появления нереально острых пиков.

### Диагностика при конвергенции

Если при анализе схем с помощью PSpice возникает конвергенция, то в выходном файле появляется следующее сообщение:

```
ERROR -- Convergence problem in transient analysis at Time = 7.920E-03
Time step = 47.69E-15, minimum allowable step size = 300.0E-15
These voltages failed to converge:
```

```
V(x2.23) = 1230.23 / -68.4137
V(x2.25) = -1211.94 / 86.6888
```

```
These supply currents failed to converge:
I(X2.L1) = -36.6259 / 2.25682
I(X2.L2) = -36.5838 / 2.29898
```

```
These devices failed to converge:
X2.DCR3 X2.DCR4 x2.ktr X2.Q1 X2.Q2
```

```
Last node voltages tried were:
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 25.2000 ( 3) 4.0000 ( 4) 0.0000 ( 6) 25.2030
(x2.23) 1230.2000 (X2.24) 9.1441 (x2.25) -1211.9000 (X2.26) 256.9700
(X2.28) -206.6100 (X2.29) 75.4870 (X2.30) -25.0780 (X2.31) 26.2810
(X3.34) 1.771E-06 (X3.35) 1.0881 (X3.36) .4279 (X2.XU1.6) 1.2636
```

Сообщение всегда включает заголовок (ERROR -- convergence problem...) и завершается концовкой (Last node voltages tried were ...). Наличие всех трех блоков, содержащихся между заголовком и концовкой, не обязательно.

Концовка «Last node voltages tried...» показывает узловые потенциалы при последней итерации Ньютона — Рафсона. Если величина потенциала любого из узлов нереально велика, это является признаком ошибки. Сообщение «These voltages failed to converge» содержит список узлов, которые не были



проверены по критерию приемлемости их величин. Там также указываются их величины во время двух последних итераций. Сообщение «These supply currents failed converge» выдает аналогичную информацию для токов через источники напряжения и индуктивности. Если любая из перечисленных величин попадает в диапазон  $\pm 10^{10}$ , это является признаком, что величина реальна. Наконец, сообщение «These devices failed to converge» выдает список элементов, в которых по критерию приемлемости их величин не были проверены токи или магнитные потоки в сердечниках.

### О токовой загрузке вентиляей

Ключевым вопросом при проектировании схем силовой электроники является вопрос определения допустимых значений токов через вентили, то есть токовой загрузки. В справочных материалах на вентили, как правило, указываются такие параметры, как средний продолжительный ток, импульсное значение тока (часто без указания длительности импульса), иногда, и очень редко, даются зависимости снижения допустимого тока через вентиль от рабочей частоты для случая протекания тока специальной формы (прямоугольной, треугольной и т. д.).

В реальных схемах формы токов и рабочие частоты могут значительно отличаться от приведенных в паспортных данных, что вызывает у разработчика затруднения при определении величины тока, допустимого для данного вентиля.

Среда OrCAD 9.2 позволяет существенным образом облегчить решение задачи о токовой загрузке вентиляей в случае, если разработчику известна максимально допустимая мощность, рассеиваемая корпусом рассматриваемого вентиля. В число переменных, определяемых средой OrCAD 9.2 для каждой вентиляющей схемы, входят значения мгновенных мощностей  $W$  (позиционное обозначение вентиля), выделяемых в каждом вентиле. Если принять во внимание среднее значение этой мощности [1], то сопоставление значения с максимально допустимой мощностью, рассеиваемой корпусом вентиля, дает полную информацию о токовой загрузке вентиля при произвольной форме протекающего через него тока и частоте его работы.

### Об использовании иерархических блоков

В Capture имеется возможность представления схемы в виде одного блока или иерархической структуры путем использования приема, применяемого при автоматизации проектирования электронных устройств (EDA), когда используется либо планарный вариант, либо иерархический. Если в схеме несколько раз используется один и тот же фрагмент, иерархическое построение дает возможность изображать его только один раз и использовать данное изображение (иерархический блок) многократно.

Различают следующие виды иерархических структур:

- простая иерархия — иерархическая структура без повторения одних и тех же фрагментов схемы, оформленных в виде иерархических блоков;
- сложная иерархия — иерархическая структура с повторением одних и тех же фрагментов схемы, оформленных в виде иерархических блоков.

Планарные проекты применяются для небольших схем, расположенных на малом количестве страниц. Планарный проект является структурой, в которой соответствующие выводы страниц соединяются с помощью объектов Off-Page Connectors. Планарные проекты не могут быть организованы с помощью иерархических объектов (блоков, портов, выводов или ссылок на иерархический проект). Структура планарного проекта приведена на рис. 1. Все страницы схемы в планарном проекте содержатся в одном каталоге и находятся на одном уровне менеджера проектов (Design Manager).

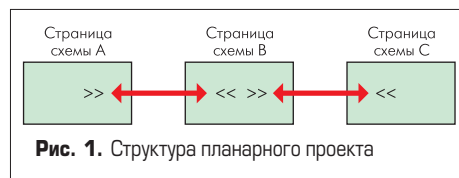


Рис. 1. Структура планарного проекта

Имеется возможность создавать объекты на страницах схемы, которые находятся в различных папках. Эти объекты называются иерархическими блоками. Многоуровневое расположение иерархических блоков называется иерархией.

Любая схемная страница может содержать иерархические блоки (или ссылки на проект с иерархической структурой), которые находятся в различных папках; структура проекта может иметь много уровней. Папка, находящаяся на высшем уровне и содержащая прямые или косвенные обращения ко всем другим папкам, называется корневой. Количество страниц в корневой папке не ограничено.

Взаимно однозначное соответствие между иерархическими блоками (или ссылками на проекты с иерархической структурой) и папками, на которые они ссылаются, называется простой иерархией. Пример простой иерархии приведен на рис. 2.

В простой иерархии каждый иерархический блок или ссылка на проект с иерархической структурой содержится в отдельной папке.

Если имеется более чем одна связь между иерархическими блоками или ссылками

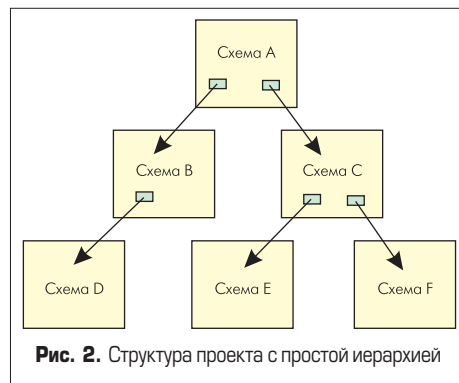


Рис. 2. Структура проекта с простой иерархией

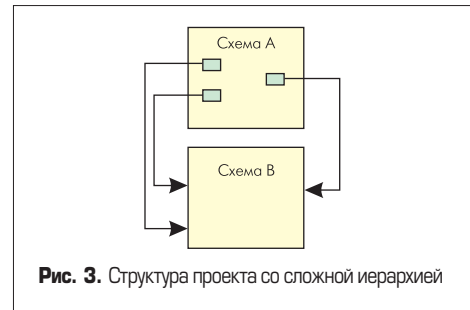


Рис. 3. Структура проекта со сложной иерархией

на проекты с иерархической структурой и папками, то такая структура называется сложной иерархией. На рис. 3 приведен пример структуры со сложной иерархией. Схема А связана со схемой В по трем различным путям.

Приведем пример использования иерархической структуры, демонстрирующий возможности сокращения графического начертания схемы и исключения дублирования однотипных фрагментов схемы. На рис. 4 дана схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах с включением нагрузки в цепь разделительного конденсатора, позволяющая получить удвоение частоты по отношению к частоте следования импульсов управления. Здесь M1 и M2 — инверторные мосты на транзисторах типа IRG4PH50UD с включением LC-цепей во вторую диагональ моста. Мосты M1 и M2 являются иерархическими блоками и подключаются к схеме с помощью иерархических выводов IN1 и OUT. Параметры и соединения остальных элементов схемы ясны из рисунка.

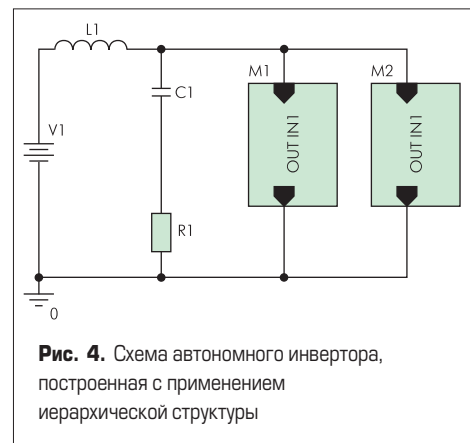


Рис. 4. Схема автономного инвертора, построенная с применением иерархической структуры

На рис. 5 приведена схема транзисторного моста, который включен в схему автономного инвертора, приведенного на рис. 4 в виде иерархических блоков M1 и M2. На рис. 5 IN1 и OUT являются иерархическими портами.

### О применении Фурье-анализа в среде OrCAD 9.2

Фурье-анализ предназначен для проведения спектрального анализа результатов моделирования. Возможно два варианта использования Фурье-анализа:

- Быстрое преобразование Фурье (FFT), которое проводится для осциллограмм, полученных в результате анализа переходных процессов. При этом в выходных файлах не содержатся численные результаты Фурье-анализа, а на экран выдаются амплитуды соответствующих гармоник как функции частоты. Для запуска быстро-

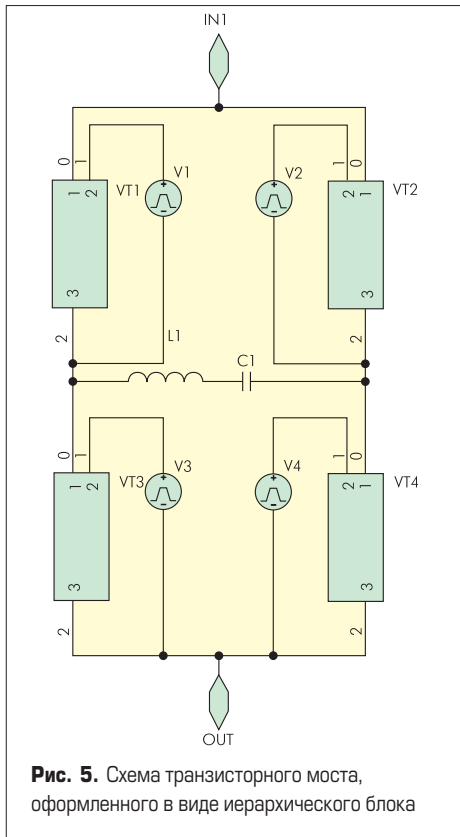


Рис. 5. Схема транзисторного моста, оформленного в виде иерархического блока

го преобразования Фурье следует выбрать пункт Fourier из выпадающего меню Trase.

- Фурье-анализ, осуществляющий обработку результатов анализа переходных процессов с выдачей результатов в численном виде. При этом выдаются постоянная составляющая анализируемой кривой, заданное число гармоник, соответствующие этим гармоникам частоты в герцах, амплитуды разложения Фурье, соответствующие каждой частоте в абсолютных и относительных величинах, абсолютные и относительные фазы смещения (относительно заданной центральной частоты) в градусах и коэффициент нелинейных искажений в процентах, определяемый по формуле:

$$K = 100 \times \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}$$

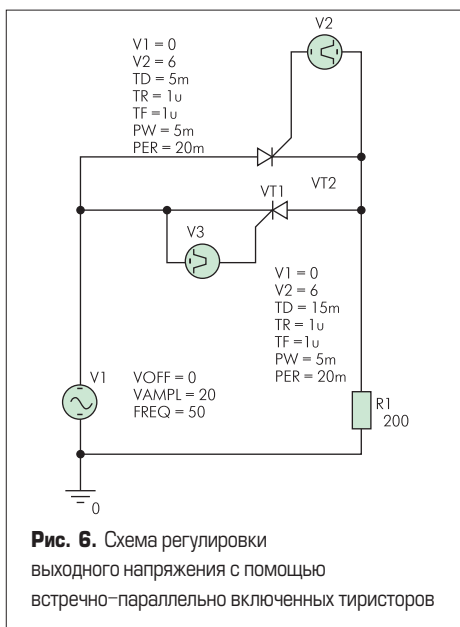


Рис. 6. Схема регулировки выходного напряжения с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров

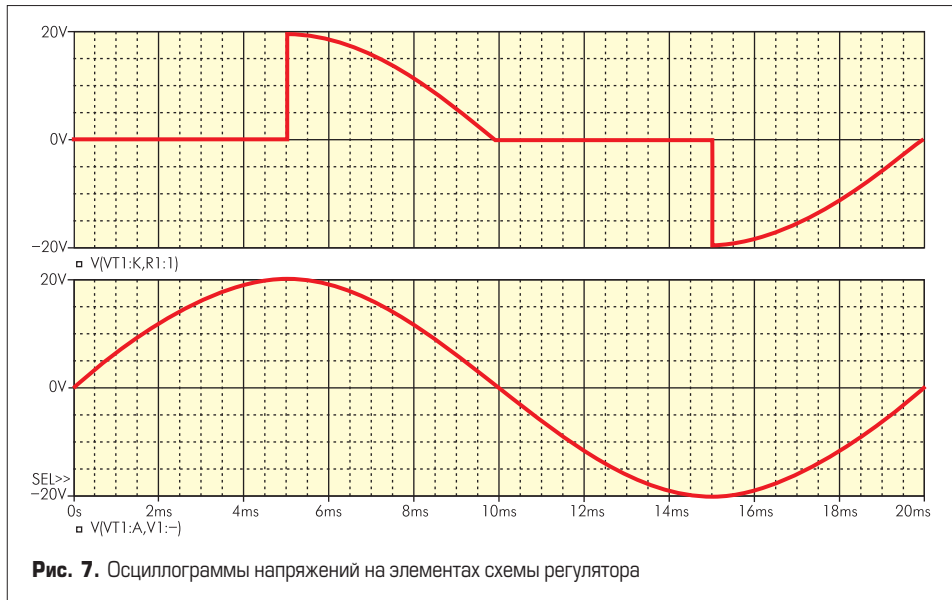


Рис. 7. Осциллограммы напряжений на элементах схемы регулятора



Рис. 8. Осциллограммы спектрального анализа напряжений на элементах схемы регулятора

При этом варианте анализа Фурье-разложение на экран не выдается. Для осуществления Фурье-анализа следует произвести следующие операции:

1. Выбрать вкладку Analysis в диалоговом окне Simulation Settings.
2. Выбрать из списка Analysis Type пункт Time Domain (Transient).
3. Нажать кнопку Output File Options...
4. Установить флажок Perform Fourier Analysis.
5. Внести в окно Center Frequency значение центральной частоты.
6. Внести в окно Number of Harmonics число требуемых гармоник. Максимально возможное количество гармоник — 100. По умолчанию берутся первые 9.
7. Внести в окно Output Variables те переменные, Фурье-анализ которых должен быть проведен.
8. Дважды нажать кнопки ОК на соответствующих модальных окнах.

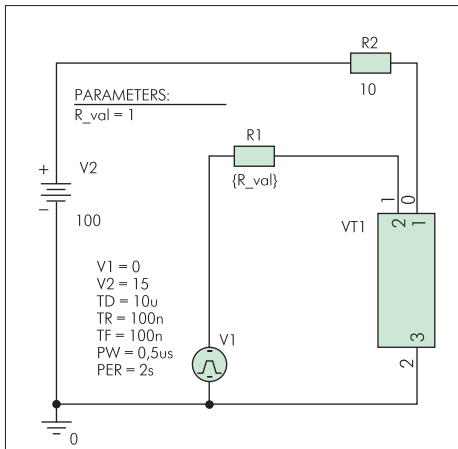
В качестве примера применения Фурье-анализа рассмотрим спектральный состав входного и выходного напряжений в схеме регулировки напряжения с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров (рис. 6). В качестве входного применяется источник синусоидального напряжения VSIN,

используются тиристоры 2N1595, в качестве нагрузки применено активное сопротивление R1. Управление тиристорами осуществляется от источников импульсного напряжения VPULSE. Численные значения параметров элементов приведены на схеме. Осциллограммы напряжений на входном источнике VSIN и на нагрузочном сопротивлении R1 приведены на рис. 7. Осциллограммы, полученные в результате быстрого преобразования Фурье, приведены на рис. 8. Характерным является ухудшение спектрального состава выходного напряжения.

### О применении параметрического анализа в среде OrCAD 9.2

Параметрический анализ представляет собой многократно повторяемые итерации одного из типов стандартных анализов, когда изменяется глобальный параметр, параметр модели, величина компонента или рабочая температура. При этом за одно обращение к среде достигается эффект, эквивалентный многократному обращению при пошаговом изменении параметра.

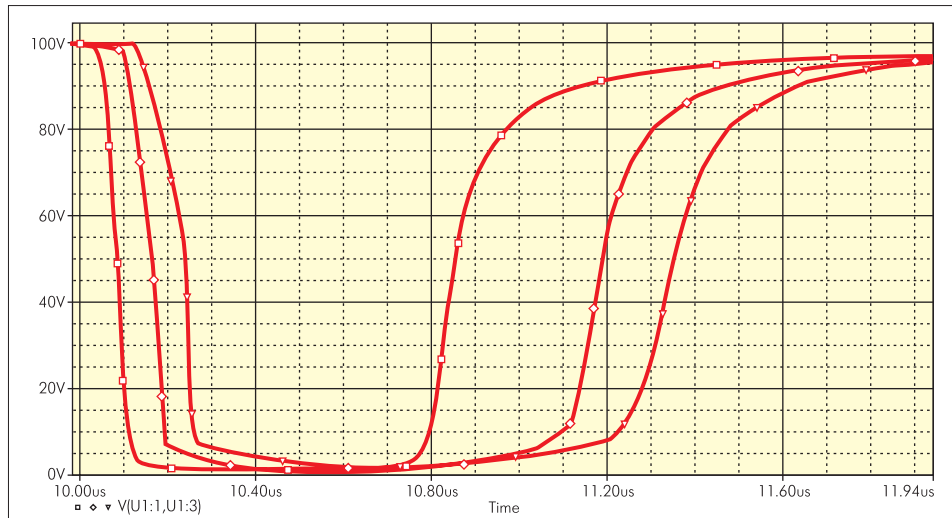
При работе в режиме параметрического анализа необходимо вместо значения эле-



**Рис. 9.** Схема для определения влияния времени задержки и крутизны включения и выключения IGBT-транзистора (параметрический анализ)

мента, величина которого является переменной, указать в фигурных скобках произвольное имя переменной. Кроме этого необходимо обратиться к библиотеке special.olb и извлечь из нее элемент PARAM, войти в свойства этого элемента и добавить свойство с именем, идентичным имени переменной, заданным в фигурных скобках. В качестве начального значения этого свойства внести начальное значение параметра.

В качестве примера параметрического анализа рассмотрим влияние сопротивления R1 в цепи затвора на скорость и время задержки включения и выключения IGBT-транзистора типа IRG4PH50UD. Принципиальная схема включения транзистора и параметры элементов схемы приведены на рис. 9 (транзистор показан условно). В качестве глобального параметра берется величина сопротивления R1. В фигурных скобках около этого сопротивления указывается имя переменной (в нашем случае {R\_val}). При обращении к элементу PARAM из библиотеки special.olb задается свойство R\_val с начальным значением, равным 1. Далее задаются следующие свойства: переменной Global parameter присваивается значение R\_val и переменной Value List присваивается список значений 1, 25, 50. На рис. 10 приведены осциллограммы напряжения на транзисторе при значениях сопротивления затвора соответственно 1 Ом, 25 Ом, 50 Ом. Из осциллограмм видно, что величина сопротивления затвора существенным образом влияет на крутизну и время задержки включения и выключения IGBT-транзистора.



**Рис. 10.** Осциллограммы напряжения на транзисторе при определении влияния времени задержки и крутизны включения и выключения (параметрический анализ)

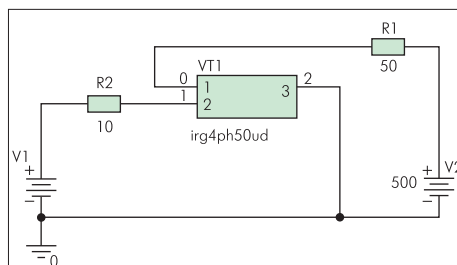
### О применении анализа по постоянному току в среде OrCAD 9.2

Анализ по постоянному току позволяет осуществлять для анализируемой цепи перебор источников (тока или напряжения), глобальных параметров, параметров модели или температуры в заданных диапазонах.

Начальное приближение для цепи рассчитывается для каждой перебираемой величины. При вычислении реакции аналоговой цепи на воздействие постоянного тока PSpice не производит временной анализ. Это осуществляется путем исключения из схемы конденсаторов, закорачиванием всех индуктивностей и использованием только постоянной составляющей источников напряжения и тока.

Для решения уравнений цепи в PSpice используется итеративный алгоритм. Для аналоговых цепей эти уравнения являются непрерывными.

В качестве примера анализа по постоянному току рассмотрим процесс включения



**Рис. 11.** Схема включения транзистора IRG4PH50UD при анализе по постоянному току

IGBT-транзистора типа IRG4PH50UD от источника постоянного напряжения (см. схему на рис. 11; транзистор показан условно). В коллекторную цепь транзистора VT1 включено сопротивление R1 величиной 50 Ом. Транзистор запитан от источника постоянного напряжения V2 = 500 В. На затвор транзистора через сопротивление R2 величиной 10 Ом для отпираания подается напряжение от источника постоянного напряжения V1. Начальное значение напряжения (Start Value) — 1 В, конечное напряжение (End Value) — 15 В, шаг изменения напряжения (Increment) — 0,1 В.

Выходной характеристикой анализа по постоянному току в рассматриваемом примере является величина напряжения на коллекторе транзистора при изменении напряжения затвора от 1 до 15 В с шагом 0,1 В. В результате проведения анализа удастся установить, что в рассматриваемой схеме (рис. 11) при изменении напряжения затвора от 1 до 4 В транзистор находится в закрытом состоянии, при изменении напряжения от 4 до 6 В — в активном режиме, а при напряжениях более 6 В — переходит в ключевой режим (рис. 12).

### О применении анализа по переменному току в среде OrCAD 9.2

Анализ по переменному току представляет собой определение реакции цепи на изменение частоты. PSpice определяет малосигнальную реакцию цепи на комбинацию входных сигналов в окрестности точки начального приближения при условии линеаризации

## Об одном способе сопоставления двух схем или одной и той же схемы, работающей в различных режимах

В случае потребности сопоставления работы двух схем, имеющих одно и то же назначение (например, выходное напряжение импульсных генераторов) или сопоставления режимов одной и той же схемы можно воспользоваться следующей осо-

бенностью среды OrCAD 9.2. Две сопоставляемые схемы могут быть внесены в один проект. При этом единственное условие, которое на них накладывается, — общая «земля». Подлежащие сопоставлению переменные могут быть выданы

на одну осциллограмму, имеется возможность рассмотрения их разности, частного от деления одной переменной на другую и т. д. Такой прием удобен, так как позволяет избежать промежуточной фиксации информации.

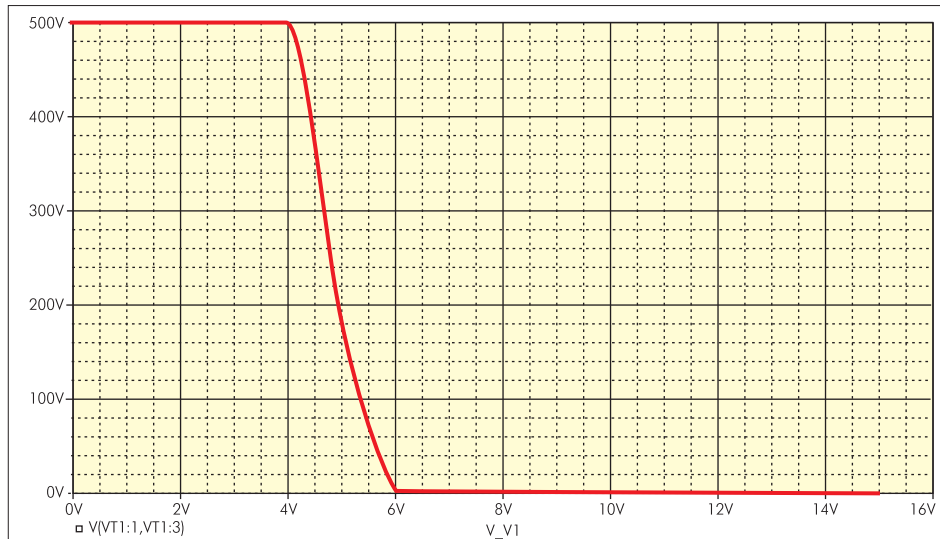


Рис. 12. Характеристика включения транзистора IRG4PH50UD при анализе по постоянному току

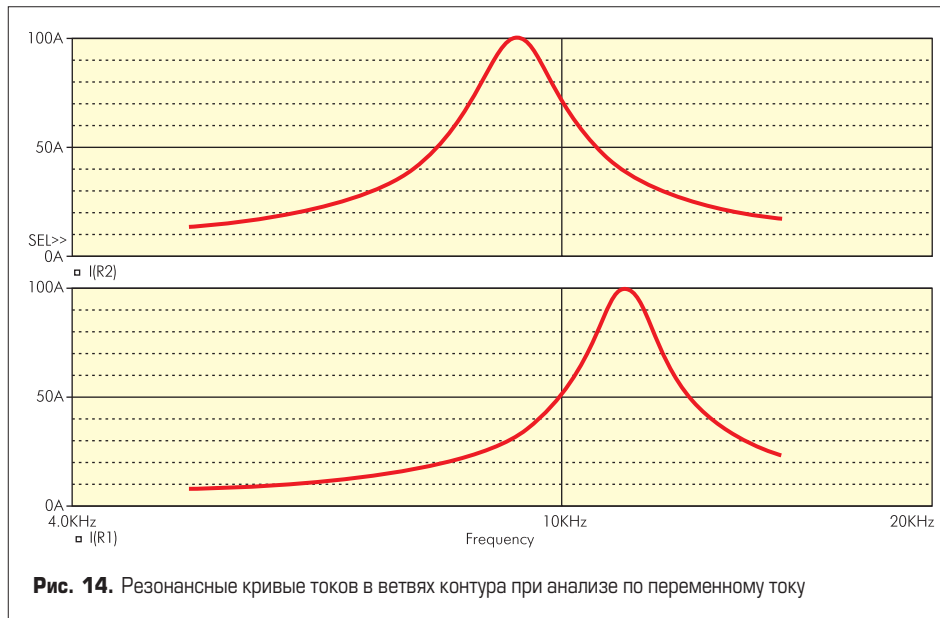


Рис. 14. Резонансные кривые токов в ветвях контура при анализе по переменному току

анализируемой цепи. При этом необходимо учитывать следующее:

- Нелинейные устройства, такие как управляемые напряжением или током ключи, преобразуются в линейные цепи в окрестности начального приближения, и только после этого PSpice A/D производит мало-сигнальный линейный анализ.

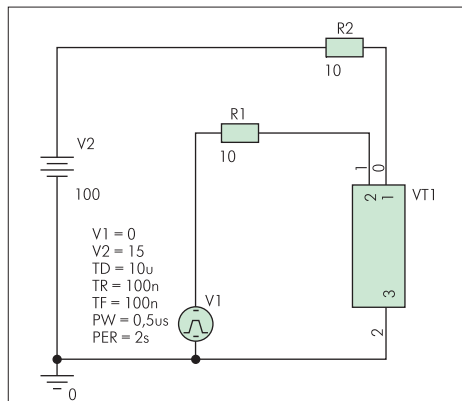


Рис. 15. Схема для определения влияния температуры на процессы коммутации транзистора

- Поскольку анализ по переменному току является линейным, определяются только амплитуда и фаза реакции цепи; напряжение и ток не ограничиваются.

Рекомендуется производить анализ по переменному току при назначении единичной

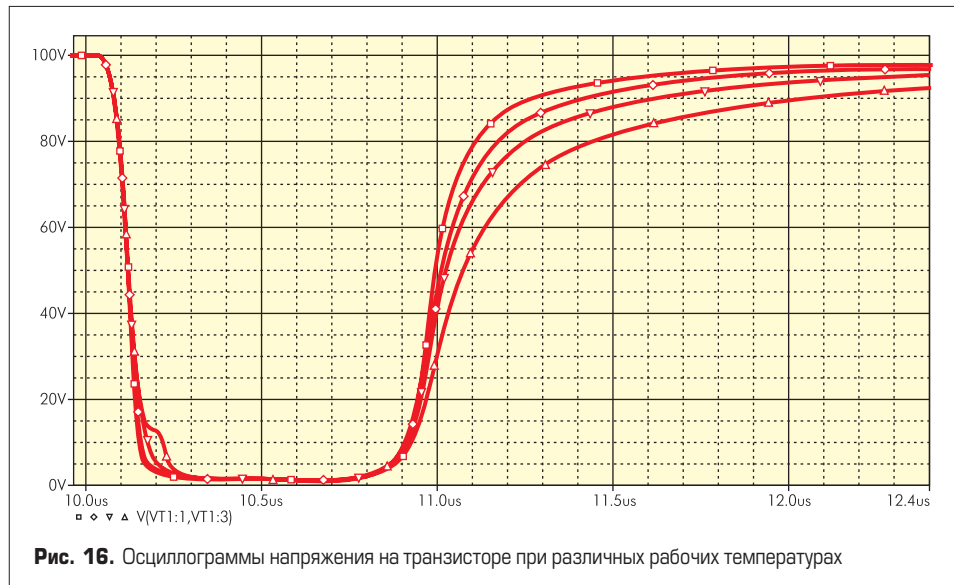


Рис. 16. Осциллограммы напряжения на транзисторе при различных рабочих температурах

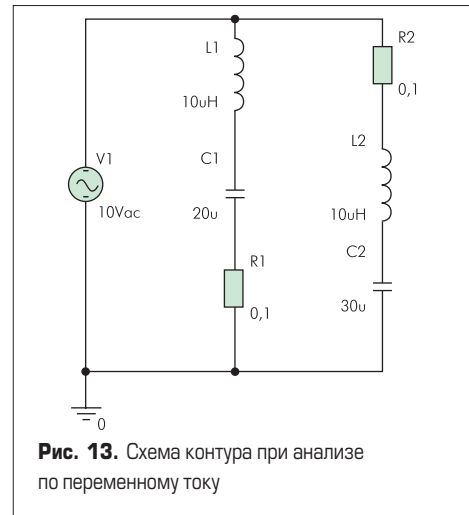


Рис. 13. Схема контура при анализе по переменному току

амплитуды источника. При этом относительная величина выходного сигнала определяется по отношению к амплитуде входного сигнала (то есть к 1).

В качестве примера анализа по переменному току рассмотрим резонансные явления в контуре, схема которого приведена на рис. 13. При назначении параметров, определяющих анализ по переменному току (AC Sweep Type), выбрана линейная шкала частот (Linear), начальная частота (Start Frequency) — 5 кГц, конечная частота (End Frequency) — 15 кГц, общее число расчетных точек (Total Points) — 10000. Осциллограммы токов через сопротивления R1 и R2 приведены на рис. 14.

При анализе по переменному току применяются источники  $V_{AC}$ , определяемые амплитудой переменной составляющей напряжения  $V_{ac}$  и постоянной составляющей  $V_{dc}$  или  $I_{AC}$ , определяемые амплитудой переменной составляющей тока  $I_{ac}$  и постоянной составляющей  $I_{dc}$ . (Не путать с источниками  $V_{SIN}$  и  $I_{SIN}$ .)

### О применении температурного анализа в среде OrCAD 9.2

При температурном анализе PSpice использует стандартные виды анализа из диалогового окна Simulation Settings при различных температурах.



Количество температурных точек при анализе может быть нулевым или отличным от нуля. Если температурная точка не определена, анализ цепи выполняется при 27 °С. Если в списке температурных точек больше чем один элемент, анализ производится для каждой температурной точки этого списка.

Установка температуры большей, чем максимально допустимая паспортная температура элемента, приводит к перерасчету значений параметров элементов, зависящих от температуры.

В качестве примера температурного анализа рассмотрим процесс коммутации IGBT-транзистора IRG4PH50UD для температур 25, 50, 75 и 100 °С. Принципиальная схема и параметры элементов приведены на рис. 15 (транзистор показан условно). На рис. 16 можно видеть осциллограммы напряжения на транзисторе для вышеприведенных температур. Моделирование показывает, что включение транзистора для данной схемы практически не зависит от температуры, а процесс выключения существенно зависит от рабочей температуры.

### Литература

1. Болотовский Ю., Таназлы Г. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2 // Компоненты и технологии: Силовая электроника. 2004. № 1.
2. PSpice User's Guide. Oregon. Cadence PCB System Division. 2000.
3. PSpice Reference Guide. — Oregon. Cadence PCB System Division. 2000.
4. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р. 2001.

## О создании модели идеального компаратора

На первом этапе рассмотрения схемы среда OrCAD 9.2 позволяет использовать идеализированные модели некоторых элементов. Для иллюстрации этого рассмотрим модель идеального компаратора.

На рис. 17 приведена схема идеального компаратора, построенного на базе элемента EVALUE. На входы IN+ и IN- подаются синусоидальные напряжения от источников VSIN. Амплитуды синусоид — 1 В, частоты — 1 кГц, сдвиг по фазе — 50°. На выходе установлено сопротивление 100 кОм. В качестве VCC и VEE заданы вели-

ны напряжений +15 В и -15 В соответственно. Осциллограммы, поясняющие работу схемы, приведены на рис. 18.

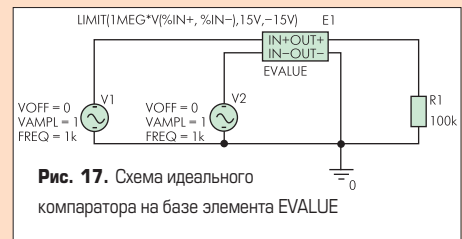


Рис. 17. Схема идеального компаратора на базе элемента EVALUE

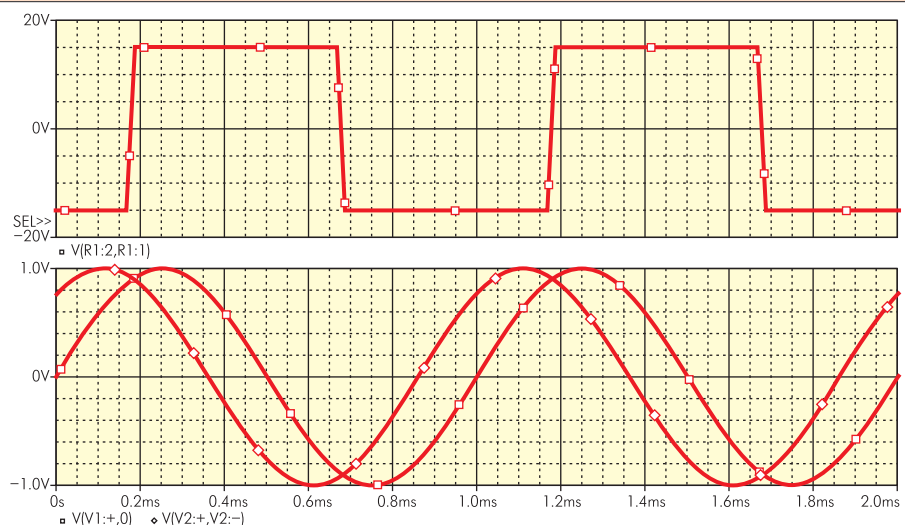


Рис. 18. Осциллограммы, поясняющие работу идеального компаратора на базе элемента EVALUE