

# Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2

## Часть III

Статья является продолжением статей «Опыт моделирования систем силовой электроники в среде ORCAD 9.2», опубликованных в журнале «Силовая Электроника» № 1, 2 за 2004 год.

Юрий Болотовский

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы

g\_thanazly@mail.ru

### Об изменении параметров, управляющих численными методами в процессе счета

Одним из способов борьбы с численной неустойчивостью (Convergence Problem) в среде OrCAD является изменение параметров, управляющих численными методами при анализе переходного процесса. Такая возможность реализуется при использовании функции SCHEDULE [1]. Данная функция может быть использована для следующих параметров:

- Maximum Step Size — максимальный временной шаг;
- RELTOL — относительная точность вычисления токов и напряжений;
- ABSTOL — абсолютная точность вычисления тока;
- VNTOL — абсолютная точность вычисления напряжения;
- GMIN — минимальная проводимость ветви электрической цепи;
- ITL4 — максимальное количество итераций на одном временном шаге.

Формат обращения к этой функции (для трех временных отрезков) следующий:

{SCHEDULE (0, H1, B, H2, C, H3)}

Запись в круглых скобках означает следующее:

- на временном отрезке от 0 до B значение выбранного параметра равняется H<sub>1</sub>;
- на временном отрезке от B до C значение выбранного параметра равняется H<sub>2</sub>;
- на временном отрезке от C до TSTOP значение выбранного параметра равняется H<sub>3</sub>.

Количество временных отрезков может быть больше (или меньше) трех.

Данную функцию целесообразно применять в следующих случаях. При анализе переходных процессов численная неустойчивость может возникнуть при текущем времени, достаточно близком к TSTOP. Стандартным выходом из сложившегося положения является определение параметров, управляющих численными методами, обеспечивающих численную устойчивость и повторение анализа переходного процесса с нулевого момента времени. Как правило, в этом

случае скорость счета падает. Применение данной функции в рассматриваемой ситуации после определения момента времени, в котором наступает численная неустойчивость (Convergence Problem) позволяет до этого момента времени осуществлять «быстрый» счет, и только в окрестности этого момента времени с учетом коррекции параметров и сохранения численной устойчивости перейти к «медленному» счету. Таким образом, суммарное время анализа переходного процесса может быть заметно сокращено.

### Об использовании параметра SKIPBP при анализе переходных процессов

Анализ переходных процессов начинается с использования определенного предварительного начального приближения (начального условия). 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.

Режим анализа по постоянному току является заданным по умолчанию. Отключить его можно с помощью активизации параметра SKIPBP [2].

Однако определение начальных условий при анализе переходных процессов в схемах силовой электроники с использованием стандартного алгоритма среды OrCAD требует осторожности. Продемонстрируем это на примере.

#### Пример 1

Пусть необходимо проанализировать переходный процесс в схеме заряда емкости C1 от источника постоянного напряжения V1 через сопротивление R1 при нулевом начальном напряжении на емкости. Параметры элементов приведены на схеме (рис. 1).

На рис. 2 приведена осциллограмма напряжения на емкости при использовании анализа по постоянному току для нахождения начального приближения (Опция SKIPBP, отвечающая за отключение анализа по постоянному току для нахождения начального приближения, деактивизирована).

При деактивизированной опции SKIPBP при моделировании начальное приближение (напряжение

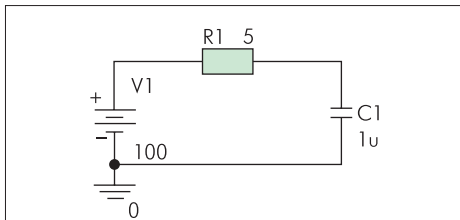


Рис. 1. Схема заряда емкости от источника постоянного напряжения через сопротивление

на емкости) определяется равным напряжению источника питания (100 В). При этом, естественно, переходный процесс отсутствует.

На рис. 3 приведена осциллограмма напряжения на емкости без использования анализа по постоянному току для нахождения начального приближения (опция SKIPBP, отвечающая за отключение анализа по постоянному току для нахождения начального приближения, активизирована).

Данный случай соответствует поставленной задаче (нулевое начальное напряжение на емкости).

Проверкой правильности работы анализа по постоянному току для нахождения начального приближения является проведение анализа переходных процессов с заданными начальными условиями (если они известны). В случае если начальные условия неизвестны, при моделировании схем силовой электроники рекомендуется отключить анализ по постоянному току для нахождения начального приближения путем активизации параметра SKIPBP.

### О моделировании схем с управляемыми ключами

Ключи, управляемые напряжением и током, достаточно широко могут применяться при моделировании систем силовой электроники. В качестве примера такой модели приведем модель псевдоидеального диода, построенную на основе ключа SBreak [3]. По умолчанию ключ характеризуется следующими значениями своих параметров: сопротивление ключа в открытом состоянии  $R_{ON}$  равно 1 Ом, сопротивление ключа в закрытом состоянии  $R_{OFF}$  — 1 МОм. Кроме этого, рекомендуется [4], чтобы отношение  $R_{OFF}/R_{ON}$  не превосходило по величине значение  $1/G_{MIN}$  (величина, обратная проводимости ветви, значение по умолчанию  $10^{12}$ ). В ряде случаев требуется моделировать ключ, в котором соотношение сопротивлений закрытого и открытого состояний превосходит  $1/G_{MIN}$ . В случае, если возникает необходимость работы с ключом, для которого  $R_{OFF}/R_{ON}$  превосходит значение  $1/G_{MIN}$ , предлагается использовать ключ на базе ключа, управляемого током (или напряжением), в исполнительную цепь которого последовательно включается положительное или отрицательное сопротивление. Схема такого ключа приведена на рис. 4.

Поясним работу данного ключа на примере 2.

#### Пример 2

Пусть требуется получить ключ с нулевым значением сопротивления в открытом состоянии и с сопротивлением в закрытом состоя-

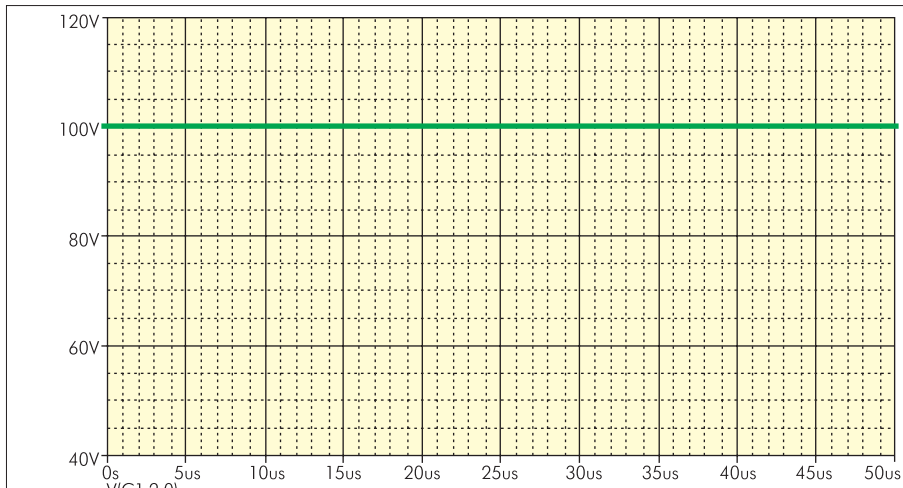


Рис. 2. Напряжение на емкости при использовании анализа по постоянному току

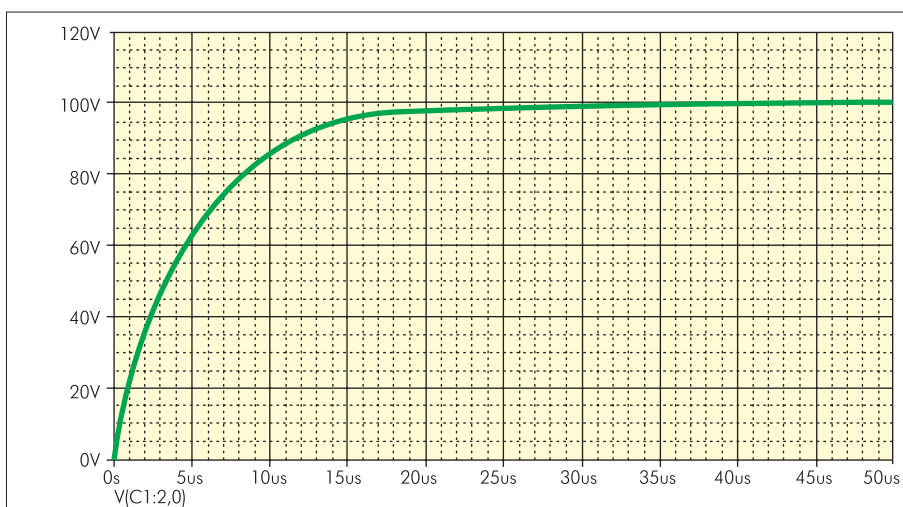


Рис. 3. Напряжение на емкости без использования анализа по постоянному току

нии  $10^6$ . Такой ключ может быть получен при значении величины сопротивления  $R = -1$  Ом.

В самом деле, результирующее сопротивление вновь построенного ключа в открытом состоянии равно  $R_{ON1} = 1 \text{ Ом} - 1 \text{ Ом} = 0$ . При этом сохраняются значения  $R_{ON}$  и  $R_{OFF}$ , принятые по умолчанию.

Проиллюстрируем работу штатного ключа SBreak для схемы, приведенной на рис. 5.

Схема состоит из источника постоянного напряжения  $V1$ , нагруженного на последовательно включенные сопротивления  $R1$  и  $R2$ . В момент времени  $TD = 50$  мс сопротивление

$R2$  необходимо замкнуть ключом с внутренним сопротивлением в открытом состоянии, равном нулю, а в закрытом состоянии равно  $10^6$ . Ключ SBreak с параметрами открытого и закрытого сопротивления по умолчанию обеспечивает работу схемы (рис. 6).

Благодаря тому, что величина сопротивления  $R2$  равна сопротивлению ключа в открытом состоянии, ток через сопротивление  $R1$

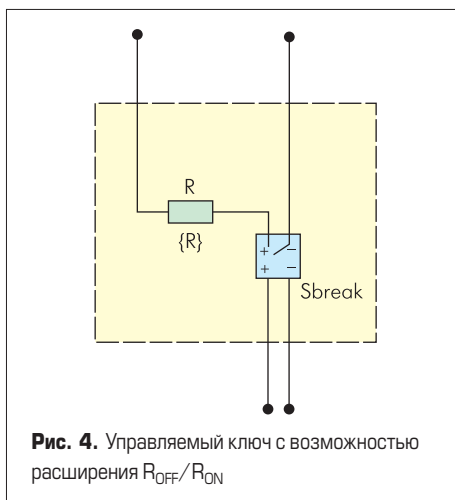


Рис. 4. Управляемый ключ с возможностью расширения  $R_{OFF}/R_{ON}$

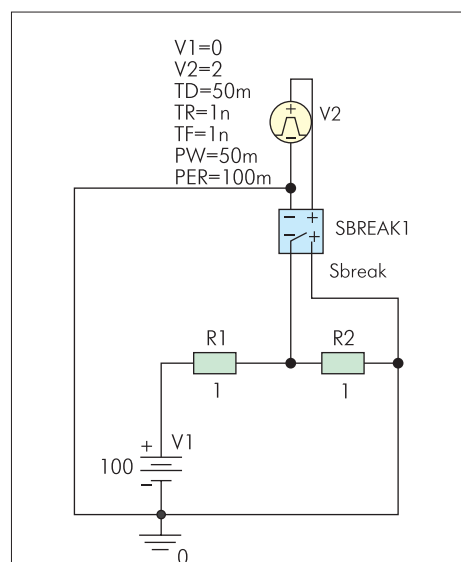
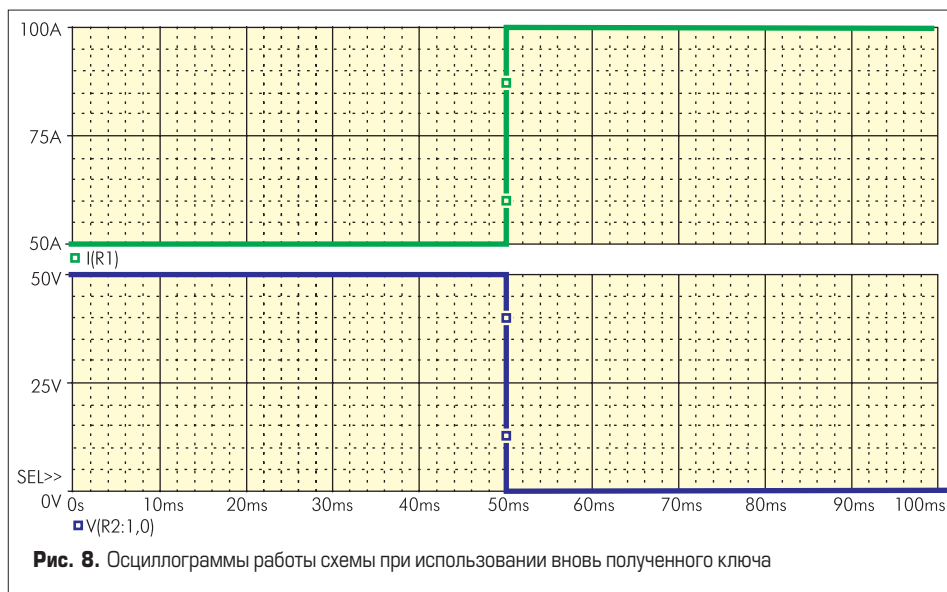
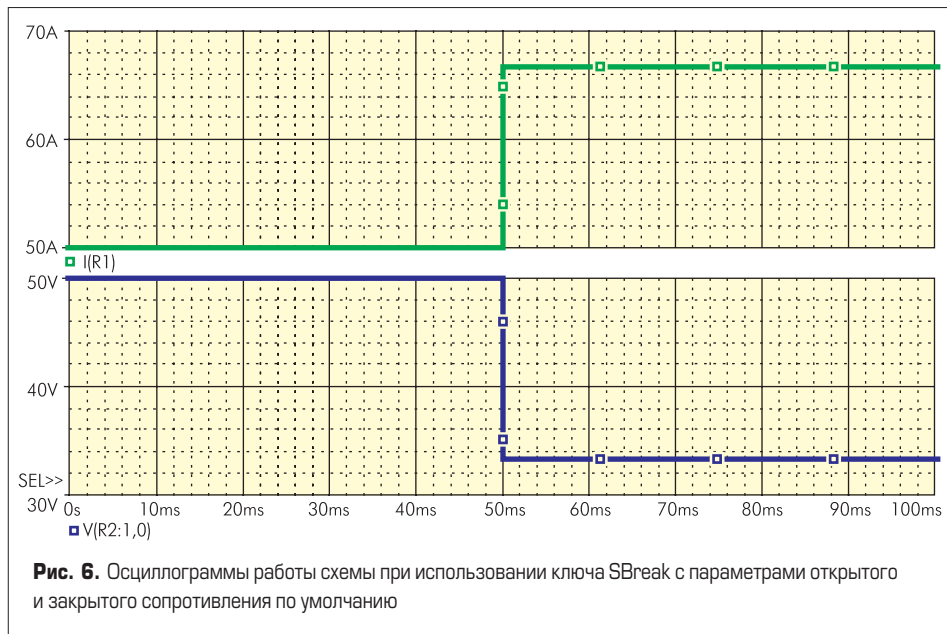


Рис. 5. Схема при работе штатного ключа



при замыкании ключа становится равным 66,66 А, а не 100 А, что было бы достигнуто при внутреннем сопротивлении ключа в открытом состоянии, равном нулю.

На рис. 7 повторена схема, приведенная на рис. 5. При этом используется вновь построенный ключ. Очевидно, что погрешность, внесенная сопротивлением -1 Ом в состоянии, когда ключ закрыт, пренебрежимо мала.

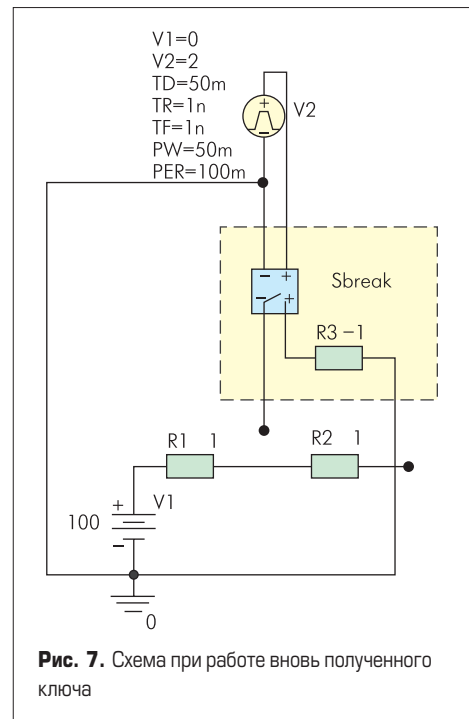
На рис. 8 приведены осциллограммы, поясняющие работу схемы, изображенной на рис. 7.

Очевидно, что комбинация стандартного ключа SBreak с добавленным в коммутируемую цепь сопротивлением -1 Ом решает поставленную задачу с высокой точностью.

Понятно, что величина добавленного сопротивления может быть как отрицательной, так и положительной, что обеспечит реализацию ключа на базе стандартного ключа SBreak при его внутренних сопротивлениях, принятых по умолчанию, а также внутреннем сопротивлении вновь построенного ключа, равном  $(R_3+1)$  Ом. Величина  $R_3$  выбирается из условий обеспечения требуемого внутреннего сопротивления ключа в открытом состоянии и допустимой погрешности, вносимой в сопротивление ключа в закрытом состоянии.

### О модели сопротивления, величина которого является функцией напряжения (времени)

При моделировании электронных систем часто бывает необходима модель сопротивления, величина которого является функцией времени. Среда OrCAD предоставляет пользователю возможность построения такой модели. Один из вариантов такой модели строится на основе функционального блока ZX (библиотека an1\_misc.olb). Блок ZX имеет пять клемм. На клеммы 1 и 2 подается изменяюще-



еся во времени напряжение  $U_{вх}$ , закон изменения которого должен соответствовать требуемому закону изменения сопротивления. Клеммы 4 и 5 являются выходными. Между клеммой 3 и «землей» помещается задающий резистор  $R_{зад}$ . При этом закон изменения выходного сопротивления  $R_{вых}$  определяется по выражению:

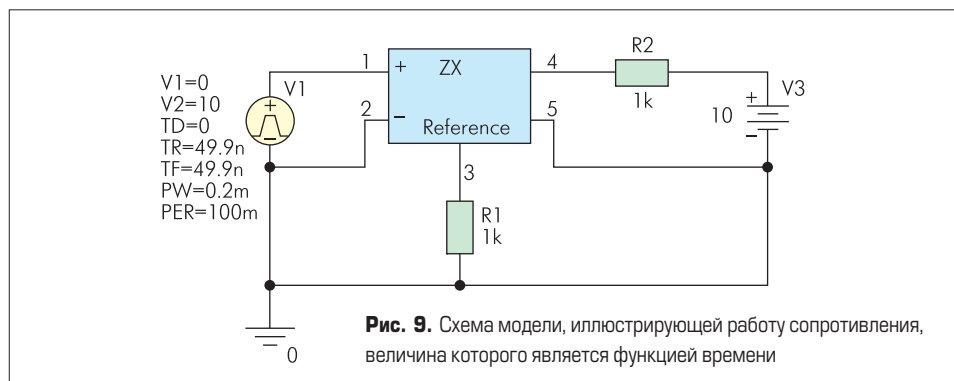
$$R_{вых} = U_{вх} \times R_{зад}$$

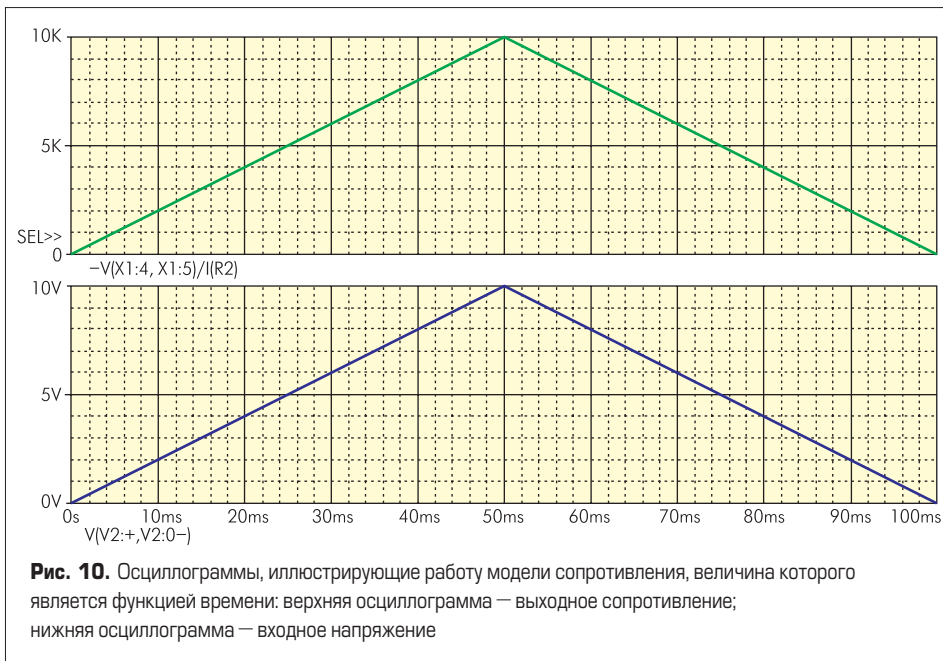
На рис. 9 приведена схема модели, иллюстрирующей работу сопротивления, величина которого является функцией времени.

В схеме модели в качестве источника напряжения V1, определяющего закон изменения выходного сопротивления, используется источник VPULSE, настроенный таким образом, что реализуется треугольный импульс напряжения с амплитудой 10 В (см. рис. 10, нижняя осциллограмма).

Выходная цепь (клеммы 4 и 5) нагружена на сопротивление R2 величиной 1 кОм, включенное последовательно с источником постоянного напряжения (VDC) V3 10 В. Величина задающего сопротивления R1 равна 1 кОм (см. рис. 9).

На рис. 10 верхняя осциллограмма получена как результат деления выходного напряжения между клеммами 4 и 5 на ток, протекающий в выходной цепи (выходное сопротивление





ние). Как видно из осциллограммы, закон изменения выходного сопротивления полностью соответствует закону изменения входного напряжения.

Как следует из вышеприведенной формулы, определяющей выходное сопротивление как произведение задающего сопротивления на величину входного напряжения, данный закон изменения выходного сопротивления может быть получен при различных соотношениях максимального напряжения источника VPULSE и величины задающего сопротивления. Такой закон может быть получен, например, при максимальном напряжении, равном 100 В и базовом сопротивлении 100 Ом, 1000 В и 10 Ом и т. д. Отметим, что при различных сочетаниях максимального напряжения источника VPULSE и задающего сопротивления изменяется только мощность, потребляемая от источника первичного напряжения. При этом мощность, выделяемая в выходной цепи, остается неизменной при любых соотношениях входного напряжения и задающего сопротивления, обеспечивающих заданный закон изменения выходного сопротивления.

Была предпринята попытка получения моделей емкости и индуктивности, которые являются функцией напряжения (и, если напряжение является функцией времени, то функцией времени). Модели емкости и индуктивности строились на базе элемента YX (библиотека anl\_misc.olb). Схемы моделей аналогичны схеме, приведенной на рис. 9. При этом для модели емкости между третьим выводом элемента YX и «землей» устанавливался задающий конденсатор, а для модели индуктивности — задающая индуктивность. Использовался линейный по времени закон изменения управляющего напряжения (VPULSE). При этом удалось получить процесс качественного изменения емкости и индуктивности без количественного повторения величин емкости и индуктивности, которые определяются по аналитической зависимости, приведенной в модели элемента YX. Предположительно, причиной этого являются погрешности, вызванные переходными процес-

сами изменения соответствующей емкости и индуктивности, а также погрешности, полученные при определении действующих значений токов и напряжений численными методами [3]. Авторы будут благодарны за любую информацию, позволяющую построить уточненные модели емкости и индуктивности, которые являются функцией напряжения (времени).

### Об одном способе оценки точности при моделировании систем силовой электроники

Вопрос о точности результатов, получаемых при моделировании в среде OrCAD, очень мало освещен в литературных источниках и является очень сложным, особенно если это касается цепей, в которых содержатся нелинейные элементы с резкими изломами вольтамперных характеристик (тиристоры, диоды, транзисторы и т. д.). Это объясняется тем, что даже незначительные погрешности вычислений напряжений и токов, протекающих через элементы с та-

кими типами нелинейности, могут привести к существенным погрешностям момента их коммутации.

Вопрос о точности получаемых при моделировании результатов осложняется еще и отсутствием критерия оценки точности (достоверности) получаемых результатов.

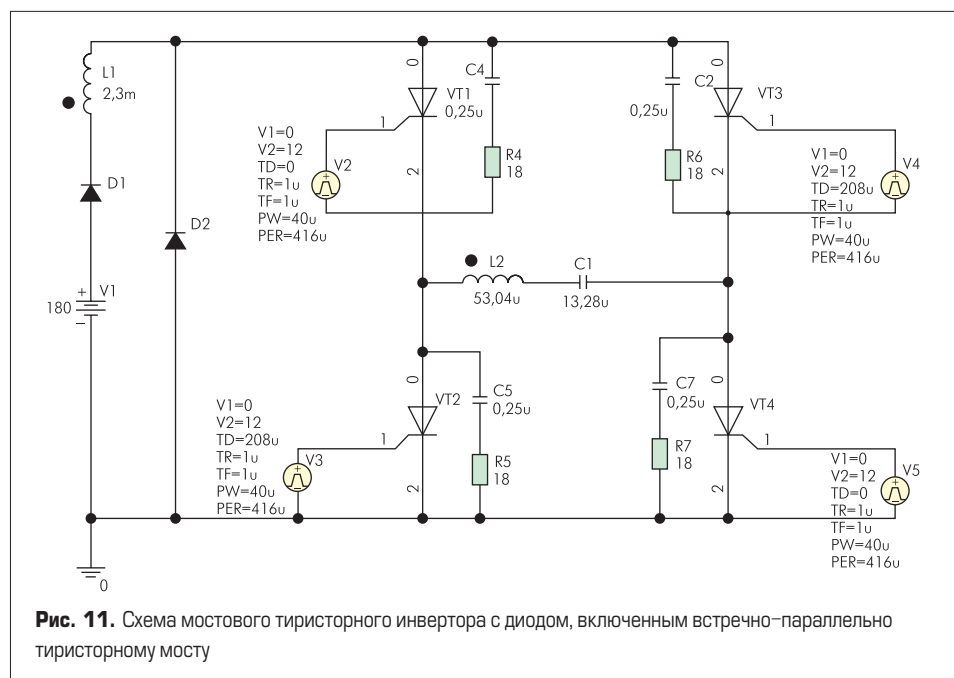
Использование в качестве критериев управляющих параметров среды OrCAD требует некоторого обсуждения. Не претендуя на общность, приведем некоторые соображения, основанные на моделировании конкретной схемы силовой электроники (мостовой тиристорный инвертор с диодом, включенным встречно-параллельно тиристорному мосту — рис. 11).

Среди управляющих параметров среды OrCAD с точностью связаны следующие:

- RELTOL — относительная точность вычисления токов и напряжений;
- VNTOL — абсолютная точность вычисления напряжения;
- ABSTOL — абсолютная точность вычисления тока;
- CHGTOL — абсолютная точность вычисления заряда.

Отметим [5], что данные погрешности являются погрешностями на шаге интегрирования, и связь их с погрешностями токов и напряжений на элементах схемы установить достаточно сложно.

Предлагается следующий способ оценки точности моделирования силовых вентиляционных схем в среде OrCAD. Оценка основана на том, что в установленном режиме мгновенные значения токов и напряжений на элементах схем силовой электроники не должны иметь аperiodической огибающей. Таким образом, за косвенную абсолютную оценку точности моделирования предлагается принимать разность максимального и минимального значений амплитуды мгновенного значения тока или напряжения на выбранном элементе схемы. Кроме того, может быть введена и относительная оценка, которая определяется как отношение абсолютной оценки к среднему



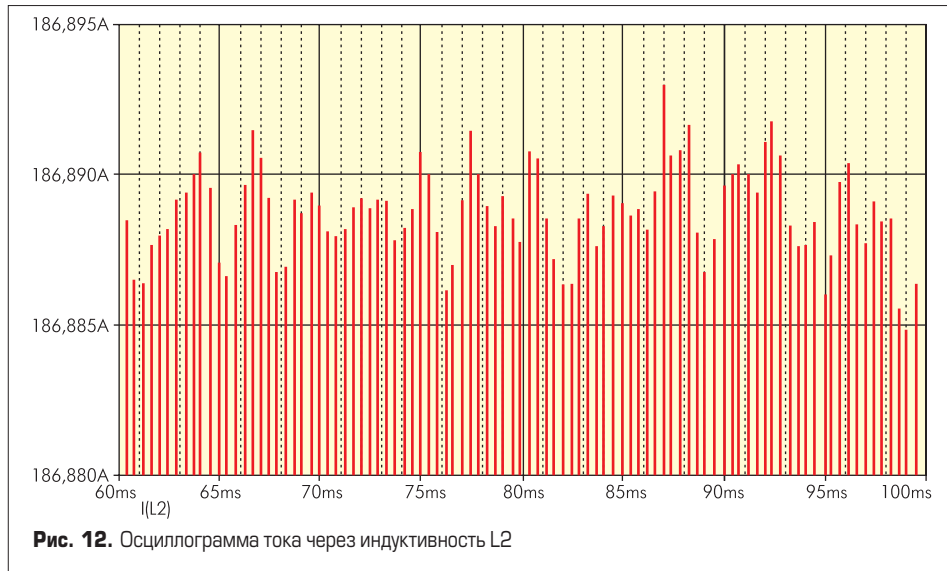


Рис. 12. Осциллограмма тока через индуктивность L2

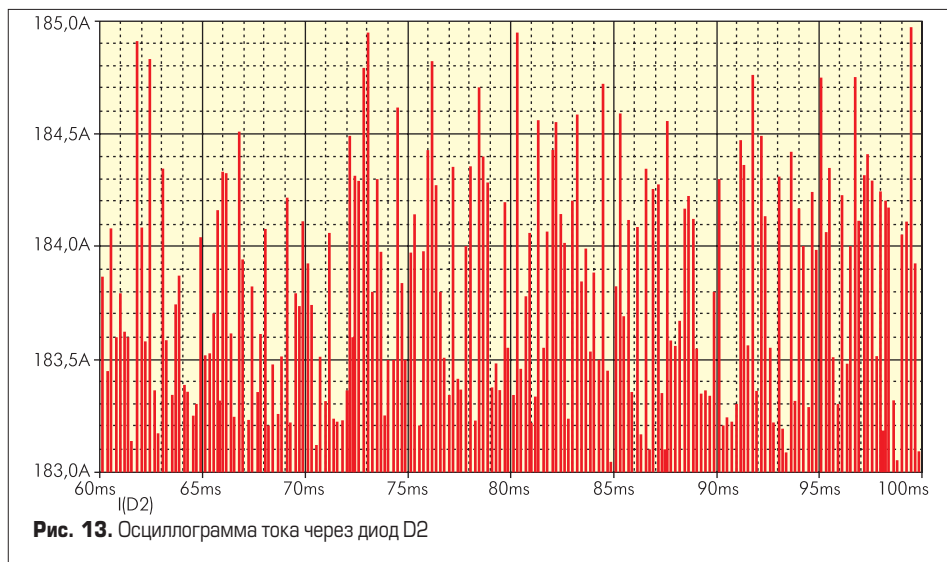


Рис. 13. Осциллограмма тока через диод D2

значению амплитуд соответствующей переменной. При этом следует обратить внимание на то, что переменные состояния (напряжения на емкостях и токи через индуктивности) при использовании данной оценки вычисляются гораздо точнее, чем переменные, которые вычисляются через переменные состояния в результате дополнительного решения соответствующих систем уравнений. Поэтому предлагаемую оценку целесообразно применять для переменных, не являющихся переменными состояния (токи через резисторы, вентили и т. д.). При этом удовлетворительность абсолютной или относительной оценки точности определяется пользователем в каждом конкретном случае.

На примере схемы, приведенной на рис. 11, поясним пользование данными оценками точности. На рис. 12 и 13 приведены осциллограммы мгновенных значений токов через индуктивность L2 и диод D2. Индуктивность L2 является переменной состояния, а ток через диод D2 вычисляется по полученным в результате численного интегрирования переменным состояниям.

Из осциллограмм видно, что и ток через индуктивность L2, и ток через диод D2 имеют неперiodические огибающие, вызванные погрешностями применяемых численных методов. Определим величины абсолютных и от-

носительных погрешностей амплитуд соответствующих токов.

Максимальное значение амплитуды тока I(L2) равняется 186,893 A, минимальное значение — 186,885 A. За истинное значение I(L2) примем значение  $(186,893 + 186,885)/2 = 186,889$  A. Абсолютная погрешность равняется 0,018 A, а относительная погрешность —  $\Delta I(L2) = 0,018/186,889 = 0,0000963$  или 0,00963%.

Максимальное значение амплитуды тока I(D2) равняется 184,975 A, минимальное значение — 183,051 A. За истинное значение I(D2) примем значение  $(184,975 + 183,051)/2 = 184,013$  A. Абсолютная погрешность равняется 1,924 A, а относительная погрешность —  $\Delta I(D2) = 1,924/184,013 = 0,0104558$  или 1,04558%.

Данная схема была промоделирована при значении RELTOL = 0,0083886. Характерно, что эта величина достаточно близка к полученной для тока I(L2) относительной погрешности (0,00963). Из этого вытекает, что даже если при управлении процессами моделирования удалось получить относительную погрешность вычисления переменной состояния, близкую к заданной величине RELTOL, то это не гарантирует получения близкой величины относительной погрешности для переменной, не являющейся переменной состояния.

Таким образом, при подборе управляющих параметров, обеспечивающих требуемую пользо-

вателю точность, при оценке этой точности по величине неперiodической огибающей в установившемся режиме необходимо выбирать переменную, не являющуюся переменной состояния.

### О проблеме конвергенции, возникающей в воздушном трансформаторе с неидеальной связью

При моделировании воздушных трансформаторов (K\_Linear) с неидеальной связью (Coupling < 1) в ряде случаев может возникнуть проблема конвергенции [6]. Перед построением модели такого трансформатора (рассматривается пример трехобмоточного трансформатора) необходимо, чтобы обеспечивалось следующее неравенство:

$$K12^2 + K13^2 + K23^2 - 2 \times K12 \times K13 \times K23 \leq 1.$$

Здесь Kij — коэффициент связи (Coupling) между i-й и j-й обмотками.

В случае если неравенство не выполняется, может возникнуть проблема конвергенции.

### О применении анализа разброса параметров методом Монте-Карло

Анализ разброса параметров методом Монте-Карло является видом статистического анализа.

При анализе методом Монте-Карло изменяются наборы допусков параметров устройств при следующих видах анализа: по постоянному току, по переменному току или переходных процессов, которые запускаются из диалогового окна Simulation Settings с номинальными значениями параметров моделируемых элементов. Перед запуском анализа следует задать модель и набор допусков на необходимые параметры модели. Начальное состояние датчика случайных чисел может задаваться в виде нечетных чисел в диапазоне 1...32767. По умолчанию оно равняется 17533.

При анализе методом Монте-Карло генерируются следующие виды отчетов:

- значения параметров модели, используемые для каждого просчета;
- кривые или набор переменных, получаемые при каждом просчете как функция определенной совокупности параметров.

Таким образом, при всех вариантах просчета есть возможность сопоставить некоторые выходные функции.

Полученные в виде результатов данные служат для анализа соответствующих зависимостей. При анализе методом Монте-Карло можно использовать анализ характеристик для построения гистограмм выходных данных.

Для анализа методом Монте-Карло может быть использовано пять вариантов выходных переменных, которые можно определить в диалоговом окне Monte Carlo (приведены в табл. 1).

Значения выходных переменных определяются для выбранных просчетов и сохраняются в выходном файле моделирования и файле данных.

Следует отметить, что даже небольшое число просчетов может привести к созданию выходных файлов больших размеров.

**Таблица 1.** Варианты выходных переменных при анализе разброса параметров методом Монте-Карло

Вариант	Характеристика
<none>	Выходные переменные не генерируются
All	Обеспечивает генерацию всех выходных данных (включая просчет, соответствующий номинальному набору исходных данных)
First*	Генерирует выходные данные только для первых <i>n</i> вариантов просчетов
Every*	Генерирует выходные данные для каждого <i>n</i> -го просчета
Runs (list)*	Производит анализ и генерирует выходные данные в соответствии со списком, в который может быть занесено до 25 значений

\* указывает на то, что можно устанавливать номер просчета в текстовом окне.

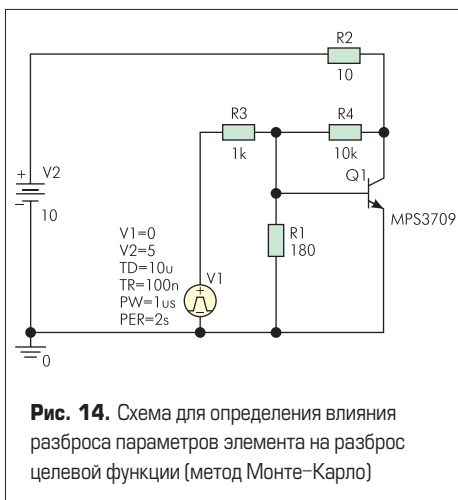
В случае проведения анализа по методу Монте-Карло PSPICE сохраняет результаты анализа по постоянному току для дальнейшей обработки и сравнения. После того как анализ с номинальным значением параметров завершен, PSPICE A/D проводит дополнительные просчеты (например, анализ по постоянному току).

Последующие просчеты осуществляются в том же виде анализа, что и просчет номинального варианта, но с принципиальным отличием: вместо использования номинальных значений параметра просчет производится со значением параметра, определенным с учетом указанных допусков, то есть с новым значением параметра.

Имеется выбор при определении количества просчетов при анализе по методу Монте-Карло. Больше количество просчетов обеспечивает более достоверные статистические данные, но при этом требуются большие затраты времени. Количество временных шкал линейно связано с количеством просчетов. Во время просчета анализа по методу Монте-Карло PSPICE обеспечивает на дисплее индикацию текущего просчета и количество уже выполненных просчетов.

По мере того как количество расчетов по методу Монте-Карло возрастает, процесс моделирования требует большего времени и размер файла данных возрастает. Увеличение размера файла данных может привести к замедлению открытия данных и замедлению вывода осциллограмм.

Один из способов избежать проявления этого эффекта состоит не в организации последо-



**Рис. 14.** Схема для определения влияния разброса параметров элемента на разброс целевой функции (метод Монте-Карло)

вательного выполнения всех просчетов по методу Монте-Карло, а в создании блока команд, обеспечивающих каждый раз новое обращение к просчету по методу Монте-Карло.

Приведем пример анализа разброса параметров методом Монте-Карло.

### Пример 3

В качестве примера анализа разброса параметров методом Монте-Карло рассмотрим влияние разброса параметров сопротивления R1 на величину коллекторного тока (целевая функция). Схема приведена на рис. 14. Численные значения параметров элементов приведены на схеме. Тип анализа — переходный процесс (Transient Analysis). Распределение случайной величины — гауссовское, число просчетов целевой функции — 5, допуск на изменение величины сопротивления R1 — 20%, количество делений интервала целевой функции для формирования гистограммы — 10.

Осциллограммы коллекторного тока и соответствующая гистограмма приведены на рис. 15. Кроме того, на рис. 15 приведены численные значения следующих статистических величин: число просчетов целевой функции (*n samples*), количество делений интервала целевой функции для формирования гистограммы (*n divisions*), среднее значение целевой функции (*mean*), среднеквадратичное отклонение целевой функции (*sigma*), минимальное значение целевой функции (*minimum*), десятипроцентная окрестность минимального значения целевой функции (*10 %ile*), медиана (*median*), десятипроцентная окрестность максимального значения целевой функции (*90 %ile*), максимальное значение целевой функции (*maximum*).

### О применении анализа чувствительности методом наихудшего случая

Анализ чувствительности методом наихудшего случая используется, чтобы найти наихудший возможный вариант режима работы схемы или устройства с учетом разброса параметров. Например, если рассматриваются три резистора R1, R2 и R3 и допуск на их сопротивление +10%, при анализе по наихудше-

му случаю будет найдена комбинация возможных значений сопротивлений, которые обеспечивают наихудший случай и будет проведено для этого варианта моделирование. При анализе чувствительности методом наихудшего случая рассматриваются три важных элемента: вход, рабочая процедура и выход.

В дополнение к описанию моделируемой схемы необходимо обеспечить следующую информацию:

- допуски параметра;
- определение понятия наихудшего случая.

Возможно установление допусков на любое количество параметров, которые характеризуют модель.

Критерий для определения наихудшего случая для расположения параметров модели в допустимых пределах их изменения определяется директивой .WC как некоторая функция базовых выходных переменных при определенном типе анализа.

В заданном диапазоне каждый параметр приводится к соответствующему значению с использованием одной из пяти функций (см. табл. 2).

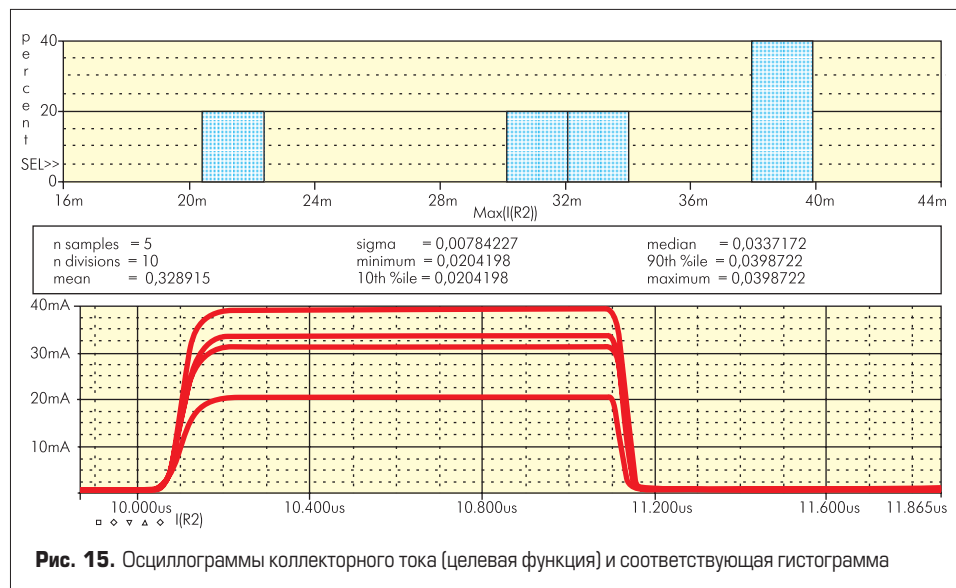
Наихудший случай определяется как наибольшее (HI) или наименьшее (LO) возможное значение функции по отношению к номинальному значению.

Чтобы установить начальное значение функции, по отношению к которой определяется наихудший случай (функция сопоставления), анализ начинается с просчета номинального режима, определяемого номинальными значениями параметров модели.

Затем с помощью ряда просчетов определяется индивидуальное воздействие каждого па-

**Таблица 2.** Функции для определения значения параметра при анализе методом наихудшего случая

Вариант	Характеристика
MAX	Максимальное значение выходной переменной
MIN	Минимальное значение выходной переменной
YMAX	Значение выходной переменной в точке, где она максимально отличается от текущего значения
RISE_EDGE	Номинальное значение, при котором выходная переменная находится выше заданного уровня
FALL_EDGE	Номинальное значение, при котором выходная переменная находится ниже заданного уровня



**Рис. 15.** Осциллограммы коллекторного тока (целевая функция) и соответствующая гистограмма

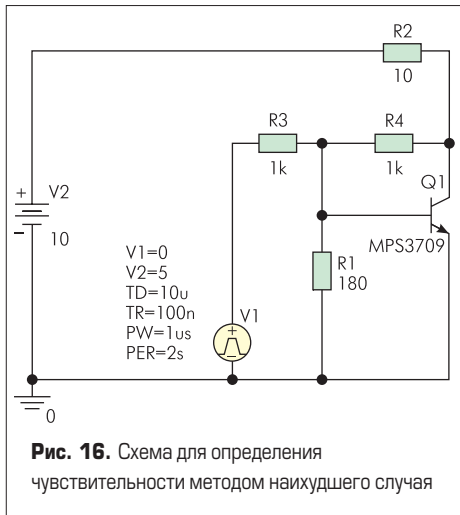


Рис. 16. Схема для определения чувствительности методом наихудшего случая

раметра модели на функцию сопоставления. Это осуществляется изменением параметров модели по одному при каждом просчете. Направление (лучше или хуже), в котором изменение функции сопоставления происходит с малым увеличением при изменении каждого параметра модели, регистрируется.

Наконец, для просчета наихудшего случая значение величины каждого параметра берется так далеко от номинала, как это позволяет допуск в направлении, которое вызывало изменение функции сопоставления к ее худшему значению (задается максимальным HI или минимальным LO относительным значением функции сопоставления).

Анализ нахождения наихудшего случая не является оптимизационным процессом; при нем не происходит поиск набора параметров, которые дают наихудший результат.

Это предполагает, что наихудший случай реализуется, когда каждый параметр находится на одном из концов интервала допуска или принимает свое номинальное значение. Наихудший случай выдается, когда функция сопоставления монотонна при всех комбинациях допусков параметров.

Обычно уверенности в том, что это утверждение истинно, нет, но проведение поиска наихудшего случая указывает на возможность аномального поведения анализируемой цепи.

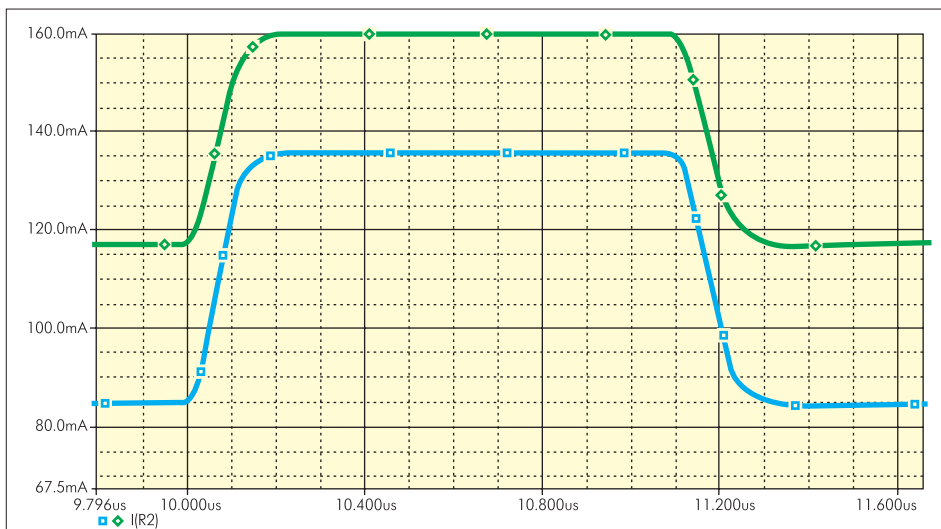


Рис. 18. Осциллограммы значений выходной переменной I(R2) для номинального режима и наихудшего случая (максимальное значение)

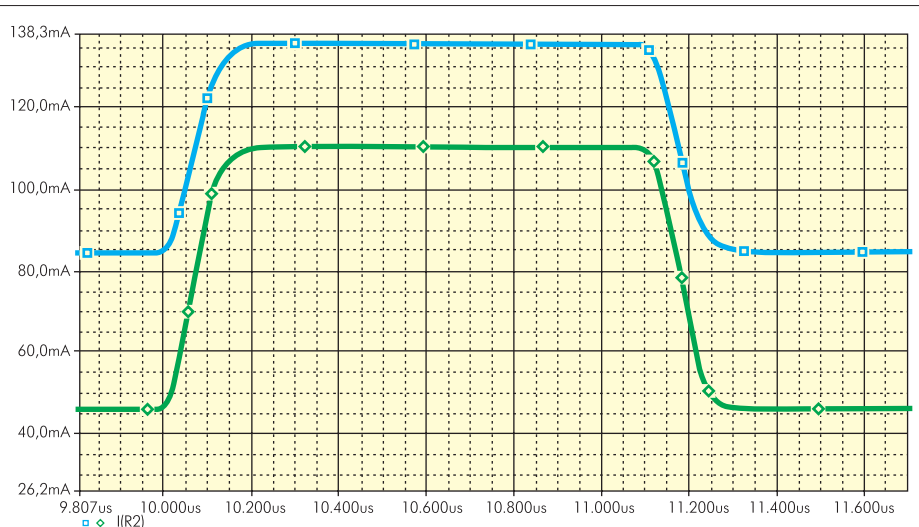


Рис. 17. Осциллограммы значений выходной переменной I(R2) для номинального режима и наихудшего случая (минимальное значение)

Результаты анализа чувствительности печатаются в выходном файле (.OUT). Этот результат показывает процентное изменение величины функции сопоставления, отнесенное к малым (по умолчанию — 1%) изменениям каждого параметра модели. Если директива .PROBE включена в файл схемы, то результаты номинального просчета и просчета для наихудшего случая сохраняются для просмотра в окне Probe. Для каждого изменяемого параметра задаются: изменение функции сопоставления в процентах и значения функции сопоставления. При применении функции сопоставления YMAX в выходном файле также перечисляются отклонения и среднеквадратичные отклонения значений. Это основывается на изменениях выходных переменных от номинального значения на каждой точке при каждом просчете анализа чувствительности.

Приведем пример анализа чувствительности методом наихудшего случая.

#### Пример 4

Анализ чувствительности методом наихудшего случая приведен на схеме (рис. 16), ко-

торая обеспечивает коммутацию биполярного транзистора MPS3709, управляемого от источника напряжения VPULSE. При этом допуск 20% имеют резисторы R1 и R4, а резисторы R2 и R3 являются постоянными (допуск на их изменение не задается). Остальные параметры элементов приведены на схеме. Функцией сопоставления является величина тока через резистор R2.

Рассмотрены два случая:

1. Минимальное значение выходной переменной I(R2) при минимальном значении функции сопоставления (LO). Осциллограммы приведены на рис. 17. При этом осциллограмма с максимальным значением тока 135,83 мА соответствует базовым значениям параметров сопротивлений R1 и R4, а осциллограмма, расположенная ниже базовой, является результатом анализа по наихудшему случаю. Выходная переменная при этом имеет значение 110,69 мА.

Ниже приведен фрагмент выходного файла .OUT для рассмотренного случая.

```

RUN                               MINIMUM VALUE
R_R1 RBREAK R 0.1357 at T = 10.5520E-06
                                (0.3163% change per 1% change in Model Parameter)
R_R4 RBREAK R 0.1356 at T = 10.5600E-06
                                (-0.5482% change per 1% change in Model Parameter)
UPDATED MODEL PARAMETERS  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
WORST CASE ALL DEVICES
Device  MODEL  PARAMETER  NEW VALUE
R_R1    Rbreak  R.8        (Decreased)
R_R4    Rbreak  R1.2      (Increased)
SORTED DEVIATIONS OF I(R_R2)  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
WORST CASE SUMMARY
The range is ( 1.02500E-05 to 1.10000E-05)
RUN                               MINIMUM VALUE
WORST CASE ALL DEVICES
                                0.1105 at T = 10.5100E-06
                                (81.418% of Nominal)

```

2. Максимальное значение выходной переменной I(R2) при максимальном значении функции сопоставления (HI). Осциллограммы приведены на рис. 18. При этом осциллограмма с максимальным значением тока 135,83 мА соответствует базовым значениям параметров сопротивлений R1 и R4, а осциллограмма, расположенная выше базовой, является результатом анализа по наихудшему случаю. Выходная переменная при этом имеет значение 159,93 мА.

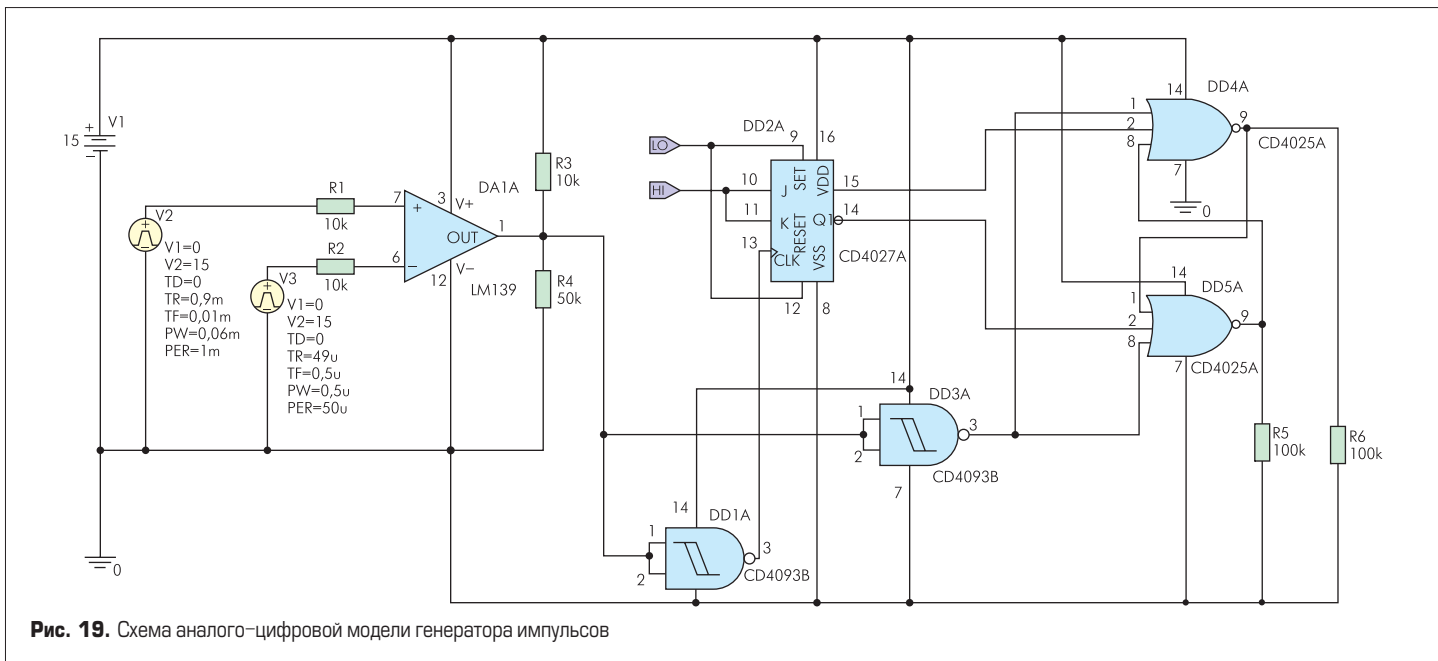


Рис. 19. Схема аналого-цифровой модели генератора импульсов

Ниже приведен фрагмент выходного файла .OUT для рассмотренного случая.

```

RUN                MAXIMUM VALUE
R_R1 RBREAK R      0.1359 at T = 10.3560E-06
                (0.3587% change per 1% change in Model Parameter)
R_R4 RBREAK R      0.1358 at T = 10.3580E-06
                (-0.5366% change per 1% change in Model Parameter)
UPDATED MODEL PARAMETERS  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
WORST CASE ALL DEVICES
Device  MODEL  PARAMETER  NEW VALUE
R_R1    Rbreak  R 1.2      (Increased)
R_R4    Rbreak  R .8      (Decreased)
SORTED DEVIATIONS OF I(R_R2)  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
WORST CASE SUMMARY
The range is ( 1.02500E-05 to 1.10000E-05)
RUN                MAXIMUM VALUE
WORST CASE ALL DEVICES
                0.1599 at T = 10.3180E-06
                (117.74% of Nominal)

```

### О моделировании смешанных аналого-цифровых устройств

При моделировании систем силовой электроники часто возникает необходимость создания комплексной модели, в которую входят система автоматики и управления силовыми вентилями и, собственно, силовой блок. Это вызывает необходимость построения смешанных аналого-цифровых моделей.

Среда OrCAD 9.2 позволяет осуществлять моделирование аналоговых, цифровых, а также смешанных аналого-цифровых устройств. При моделировании цифровых устройств предоставляются следующие возможности:

- использование примитивов цифровых устройств и их комбинаций [2];
- использование цифровых элементов, являющихся моделями реально существующих цифровых устройств (например, библиотека CD4000.lib, содержащая модели цифровых элементов общеизвестной цифровой серии).

Перечисленные возможности практически перекрывают подавляющее большинство встречающихся на практике случаев построения цифровых и аналого-цифровых систем. Однако если все-таки возникнет необходимость моделирования цифровой системы, формирование которой не удастся осуществить стандартными методами, пользователь может построить собственную цифровую модель.

Законченная модель цифрового устройства имеет три основные характеристики:

- 1) функциональные зависимости: описаны уровнем затвора и цифровыми примитивами поведения, включенными в подсхему;
- 2) входные-выходные зависимости: описаны моделью входа-выхода, интерфейсом подсхемы и источниками питания, относящимися к логическому семейству;
- 3) временные зависимости: описаны одной или более временными моделями, примитивами межвыводной задержки или примитивами проверки состояния.

При моделировании аналого-цифровых устройств осуществляется возможная их стыковка с применением стандартных интерфейсов AtoD и DtoA, которые подключаются по умолчанию автоматически, либо построение собственных интерфейсов пользователя. Для использования стандартных интерфейсов необходимо подключить к проекту библиотеку dig\_io.lib.

В библиотеках PSPICE (например, SOURCSTM.lib) содержатся цифровые источники сигналов с широким набором функциональных свойств, применение которых

Таблица 3. Уровни интерфейса входа-выхода

Уровень	Характеристика уровня
0	Расчетное значение переменной в цифровых примитивах
1	Минимально возможное значение переменной в цифровых примитивах
2	Более вероятное значение переменной в цифровых примитивах
3	Максимально возможное значение переменной в цифровых примитивах

во многих случаях может упростить решение задач моделирования цифровых устройств.

Для работы с цифровыми элементами имеются источники постоянного логического нуля \$D\_LO и постоянной логической единицы \$D\_HI.

При работе с моделями выпускаемых промышленностью цифровых элементов PSPICE позволяет применять либо стандартное напряжение питания (5 В), либо напряжение питания по желанию пользователя.

В среде OrCAD 9.2 предусмотрены уровни интерфейса входа-выхода цифровых моделей от 0 до 3. Смысл значения уровней приведен в таблице 3.

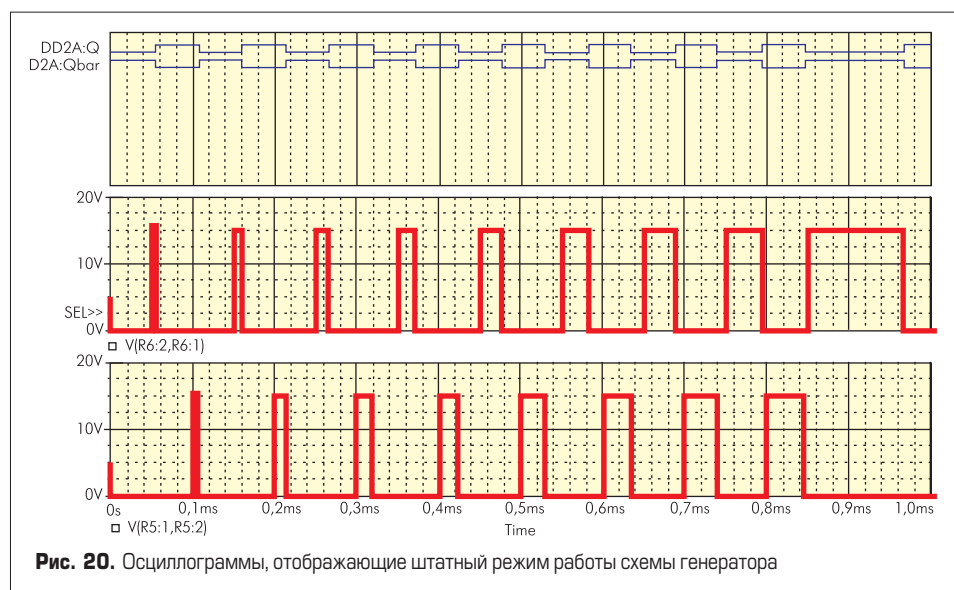


Рис. 20. Осциллограммы, отображающие штатный режим работы схемы генератора



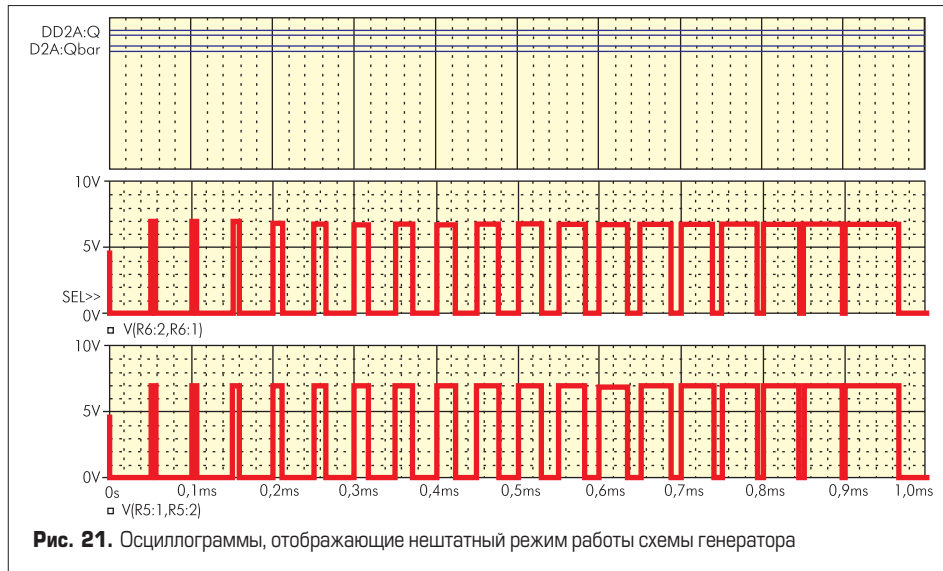


Рис. 21. Осциллограммы, отображающие нештатный режим работы схемы генератора

При моделировании цифровых схем имеются всего три начальных состояния триггера: логический ноль (0), логическая единица (1) и неопределенное состояние (X). По умолчанию используется неопределенность.

#### Пример 5

Рассмотрим пример моделирования варианта схемы, обеспечивающей генерирование двух последовательностей противофазных прямоугольных импульсов, длительность которых плавно увеличивается при постоянстве периода их следования. Данная модель может быть использована в качестве системы управления двухканальной силовой схемой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Принципиальная схема модели приведена на рис. 19. В схеме используется два генерато-

ра пилообразного напряжения, выполненных на источниках V2, V3 типа VPULSE, компаратор LM139, триггер CD4027A, двухвходовые элементы И-НЕ с петлей гистерезиса CD4093B и трехвходовые элементы ИЛИ-НЕ CD4025A.

Все применяемые микросхемы запитаны от источника постоянного напряжения V1 15 В. Для того чтобы таким образом запитать микросхемы, необходимо было визуализировать выводы питания микросхем. На соответствующие входы триггера подаются логический ноль \$D\_LO и логическая единица \$D\_HI. Характерным является то, что установка начального состояния триггера определяет режим работы схемы. На рис. 20 приведены осциллограммы работы схемы в штатном режиме, когда начальное состоя-

ние триггера — логическая единица. Осциллограммы, приведенные на рис. 21, соответствуют начальному состоянию триггера — неопределенность. Работа схемы в этом случае является нештатной.

В данном примере использовались стандартные аналого-цифровой и цифро-аналоговый интерфейсы (подключение библиотеки dig\_io.lib).

Верхний луч на осциллограммах (рис. 20, 21) отображает цифровые сигналы выходов триггера, а остальные осциллограммы отображают аналоговые сигналы, соответствующие напряжениям на резисторах R5 и R6.

В заключение авторы просят читателей присылать вопросы, возникшие у них при моделировании в OrCAD. Возможно, ответы на эти вопросы будут изложены в последующих публикациях данного цикла.

#### Литература

1. PSpice Frequently Asked Question. [www.orcad.com](http://www.orcad.com)
2. PSpice User's Guide. Oregon: Cadence PCB System Division. 2000.
3. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. М.: «СОЛОН-Пресс». 2005.
4. PSpice Reference Guide. Oregon: Cadence PCB System Division. 2000.
5. Петраков О. М. Создание аналоговых PSpice моделей радиоэлементов. М.: ИП «РадиоСофт». 2004.
6. Yilmaz, Tokad and Myril B. Reed. Criteria and Tests for Realizability of the Inductance Matrix. Trans. AIEEE. Part I. Communications and Electronics. Vol. 78. Jan. 1960.