

# Опыт моделирования систем силовой электроники в среде ORCAD 9.2

## Часть V

**В данной статье, продолжающей цикла статей, опубликованных в журнале «Силовая электроника» № 1, 2'2004), 2, 4'2005, рассматриваются вопросы, связанные с ограничениями, которые накладываются на модель в связи с одновременным учетом «быстрых» и «медленных» процессов и точностью задания временных интервалов и отображения осциллограмм, а также описывается ряд источников питания из библиотеки Source.lib и приемы их использования.**

**Юрий Болотовский,**  
к. т. н.

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы,**  
к. т. н.

g\_thanazly@mail.ru

### Проблема постоянных времени

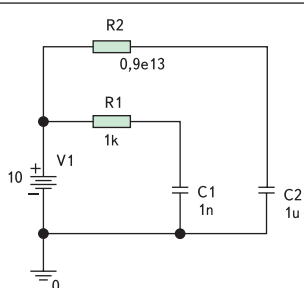
Одна из причин, которая в ряде случаев может препятствовать получению результатов моделирования в PSpice, определяется так называемой проблемой постоянных времени. Суть этой проблемы сводится к следующему: если в анализируемой схеме присутствуют очень «быстрые» и очень «медленные» процессы, то есть процессы, протекающие с малой постоянной времени и с большой постоянной времени, то максимально допустимая величина шага интегрирования ограничена малой постоянной времени, а длительность переходного процесса определяется большой постоянной времени. В случае если эти постоянные времени существенно различаются, то объем вычислительной работы, необходимой для анализа всего переходного процесса, может стать неприемлемым из-за нереально большого расхода машинного времени.

Проиллюстрируем это на примере. На рис. 1 приведена схема заряда емкостей C1, C2 через резисторы R1, R2 с различными постоянными времени  $T1 = R1 \times C1$  и  $T2 = R2 \times C2$ . При этом постоянная времени T1 была неизменной и при  $R1 = 10^3$  Ом и  $C1 = 10^{-9}$  Ф равнялась  $10^{-6}$  с. Постоянная времени T2 за счет изменения сопротивления R2 и при постоянной величине емкости  $C2 = 10^{-6}$  Ф изменялась в пределах от  $10^3$  с до  $0,9 \times 10^7$  с. При этом отношение T2/T1 изменялось от  $10^3$  до  $0,9 \times 10^{13}$ . Длительность переходного процесса принималась равной  $5 \times T2$ . Анализ пе-

**Таблица 1.** Общее время моделирования схемы ( $T_{JT}$ ) в зависимости от отношения постоянных времени T2/T1

T2/T1	$T_{JT}$ , с
$10^3$	0,05
$10^4$	0,04
$10^5$	0,04
$10^6$	0,03
$10^7$	0,03
$10^8$	0,03
$10^9$	0,18
$10^{10}$	1,58
$10^{11}$	11,72
$10^{12}$	125,97
$0,5 \times 10^{13}$	688,99
$0,9 \times 10^{13}$	1442,1
$10^{13}$	*

\* — на компьютере Pentium III 1000 МГц с ОЗУ 512 Мбайт за 1 час 10 минут завершить моделирование не удалось.



**Рис. 1.** Схема, иллюстрирующая проблему постоянных времени при моделировании



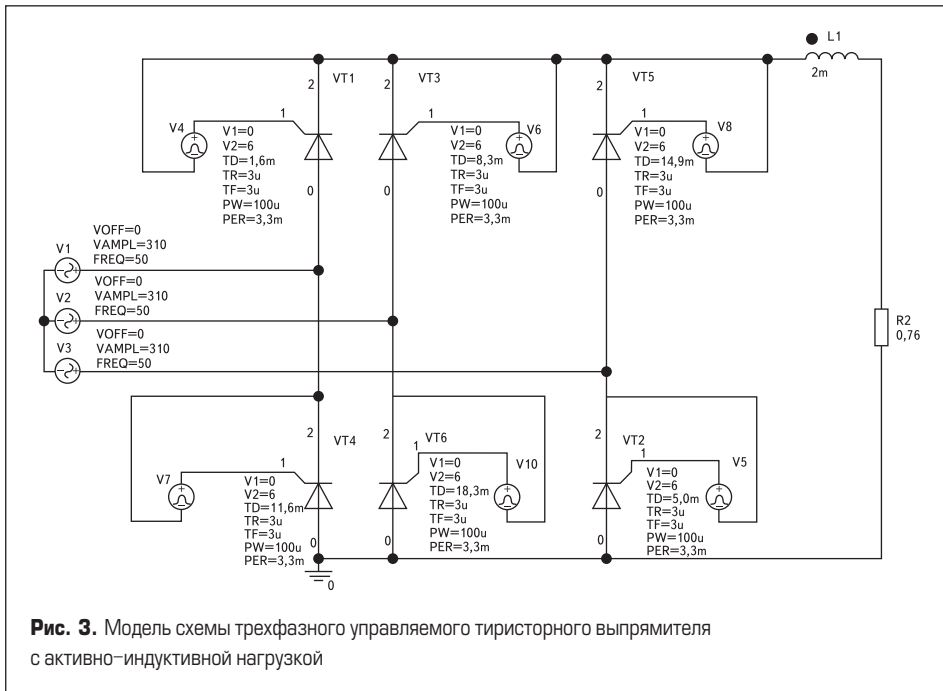
**Рис. 2.** Общее время моделирования схемы ( $T_{JT}$ ) в зависимости от отношения постоянных времени T2/T1

реходных процессов производился при значениях управляющих опций OrCAD по умолчанию. При этом фиксировалось общее время моделирования (Total Job Time —  $T_{JT}$ ). Результаты эксперимента приведены в таблице 1 и на графике (рис. 2).

Примерами очень «быстрых» и очень «медленных» процессов могут быть колебания, частоты которых существенно различаются, длительный импульс с очень коротким фронтом и т. д. Для предотвращения проблем, связанных с невозможностью завершить процесс моделирования, необходимо проанализировать моделируемую схему и путем исключения соответствующих элементов схемы или изменения их параметров уменьшить отношение соответствующих постоянных времени.

### Точность задания временных интервалов при моделировании

В ряде случаев точность, а иногда и достоверность моделирования определяется точностью задания временных интервалов в модели. Особенно тщательно определение точности задания временных интервалов необходимо проводить при моделировании периодических процессов. В этом случае причиной снижения точности и достоверности может служить накопление временной погрешности, которое происходит от периода к периоду анализируемого процесса.

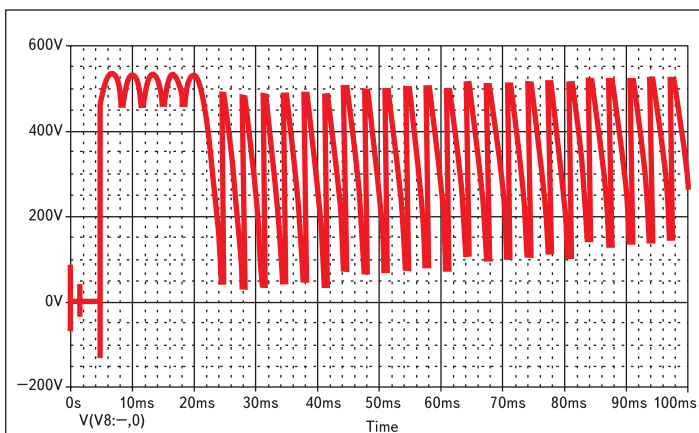


Рассмотрим потерю адекватности модели из-за низкой точности задания временных интервалов на примере моделирования схемы трехфазного управляемого тиристорного выпрямителя (схема Ларионова) с активно-индуктивной нагрузкой. Схема приведена на рис. 3.

В схеме использована модель тиристора ТБ143-630-14 [1]. Система управления моделируется шестью источниками типа VPULSE с соответствующими сдвигами по времени TD. Трехфазная сеть моделируется с помощью источников VSIN, фазы которых для V1 = 0, для V2 = -120 эл. градусов, для V3 = 120 эл. градусов. Остальные параметры элементов ясны из рисунка.

Причиной потери точности при моделировании в рассматриваемом случае является то, что отношение периода промышленной частоты (50 Гц — период 20 мс) и периода включения тиристоров — 3,(3) мс выражается иррациональным числом.

На рис. 4 приведена осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления (параметры TD и PER) заданы с точностью до одного знака после запятой (табл. 2).



**Рис. 4.** Осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления заданы с точностью до одного знака после запятой при TSTOP = 100 мс

Характерным для данной осциллограммы является то, что режим работы схемы меняется после периода промышленной частоты — 20 мс. Очевидно, это происходит из-за того, что осуществляется накопление погрешности в моменты включения тиристоров из-за низкой точности задания параметров TD и PER.

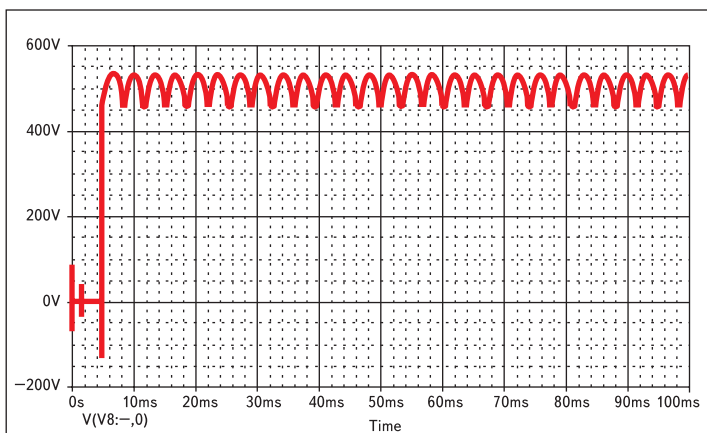
**Таблица 2.** Параметры TD и PER, заданные с точностью до одного знака после запятой

	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
TD	1,6m	5,0m	8,3m	11,6m	14,9m	18,3m
PER	3,3m	3,3m	3,3m	3,3m	3,3m	3,3m

На рис. 5 приведена осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления (параметры TD и PER) заданы с точностью до двух знаков после запятой (табл. 3).

Осциллограмма на рис. 5 соответствует штатному режиму работы выпрямителя.

Характерным является то, что штатный режим работы, приведенный на рис. 5, получен для времени окончания счета TSTOP = 100 мс. То, что для этого значения TSTOP удалось



**Рис. 5.** Осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления заданы с точностью до двух знаков после запятой при TSTOP = 100 мс

**Таблица 3.** Параметры TD и PER, заданные с точностью до двух знаков после запятой

	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
TD	1,66m	5,00m	8,33m	11,66m	14,99m	18,33m
PER	3,33m	3,33m	3,33m	3,33m	3,33m	3,33m

получить штатный режим работы, говорит лишь о том, что накопление погрешности на временном интервале (0–100 мс) не вызывает изменений в режиме, получаемом при моделировании. Это не дает основания надеяться на то, что модель, полученная при значениях параметров TD и PER, соответствующих таблице 3, будет адекватна для больших значений TSTOP, поскольку с увеличением TSTOP идет процесс накопления погрешностей для параметров импульсов управления.

Для демонстрации этого на рис. 6 приведена осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления заданы с точностью до двух знаков после запятой (табл. 3) для TSTOP = 200 мс.

Из рис. 6 следует, что накопление погрешностей параметров импульсов управления, приводящее к недостоверным результатам моделирования, в рассматриваемом случае произошло в момент времени около 117 мс.

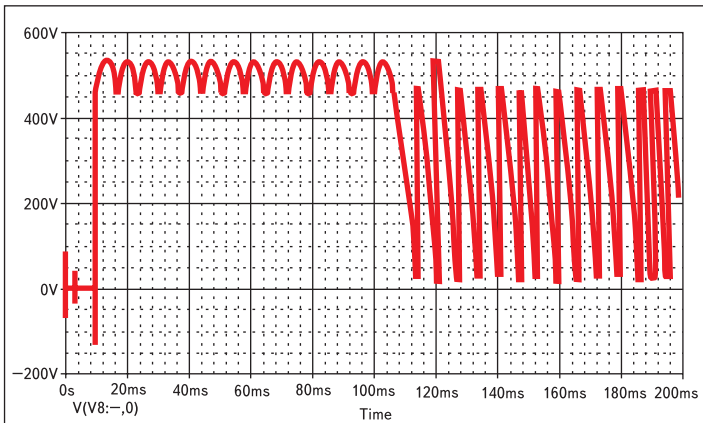
Для того чтобы обеспечить адекватную работу модели для TSTOP = 200 мс, необходимо задание параметров TD и PER с точностью до трех знаков после запятой (табл. 4).

На рис. 7 приведена осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления заданы с точностью до трех знаков после запятой (табл. 4) для TSTOP = 200 мс.

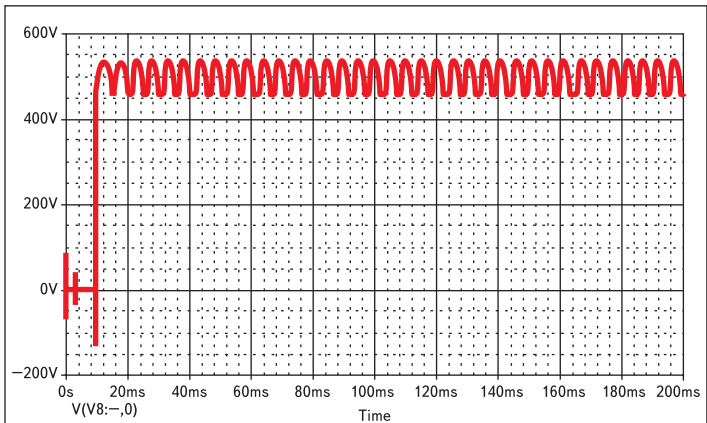
Приведенный пример иллюстрирует необходимость тщательного определения задания точности для временных параметров модели и соответствующего значения TSTOP для получения адекватных результатов.

**Таблица 4.** Параметры TD и PER, заданные с точностью до трех знаков после запятой

	VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6
TD	1,666m	5,000m	8,333m	11,666m	14,999m	18,333m
PER	3,333m	3,333m	3,333m	3,333m	3,333m	3,333m



**Рис. 6.** Осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления заданы с точностью до двух знаков после запятой при  $TSTOP = 200$  мс



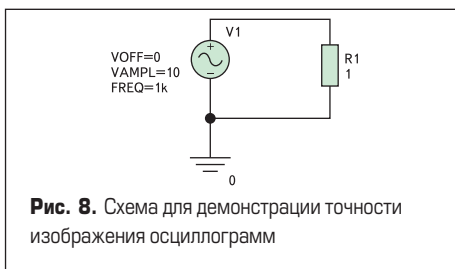
**Рис. 7.** Осциллограмма напряжения на выходе выпрямителя в случае, если временные параметры импульсов управления заданы с точностью до трех знаков после запятой при  $TSTOP = 200$  мс

### О точности отображения осциллограмм

Отметим, что управляющие опции моделирования [2] определяют не только точность получения результатов моделирования, но и точность изображения осциллограмм. Покажем это на примере.

На рис. 8 приведена простейшая схема, в которой источник VSIN с амплитудой 10 В и частотой 1 кГц нагружен на сопротивление 1 Ом. Постоянная составляющая VOFF равна нулю.

Управляющие опции для данной схемы были приняты по умолчанию. Схема просчиты-



**Рис. 8.** Схема для демонстрации точности изображения осциллограмм

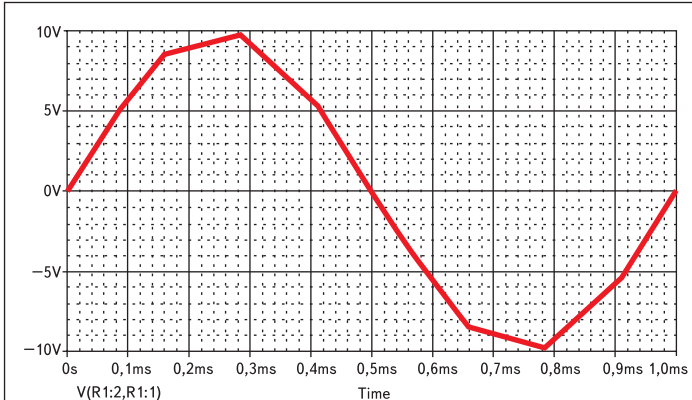
валась для  $TSTOP$  20, 10, 5 и 1 мс. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. 9–12.

В таблице 5 приведены соответствующие значения  $TSTOP$ , Maximum Step Size ( $h_{max}$ ), значение напряжения на резисторе в точке 0,3 мс

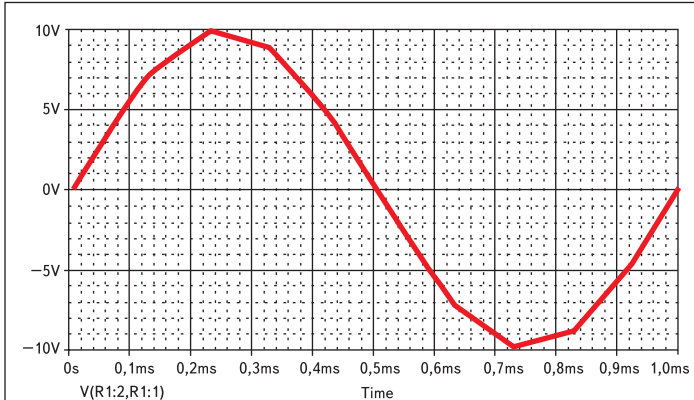
**Таблица 5.** Таблица, демонстрирующая погрешности вычисления и изображения на осциллограмме результатов моделирования в зависимости от величины  $h_{max}$

$TSTOP$	$h_{max}$	V (0,3 мс)	$\Delta V/V$
20 мс	0,4 мс	9,23122	2,97%
10 мс	0,2 мс	9,12576	4,08%
5 мс	0,1 мс	9,41483	1,04%
1 мс	0,01 мс	9,50675	0,07%

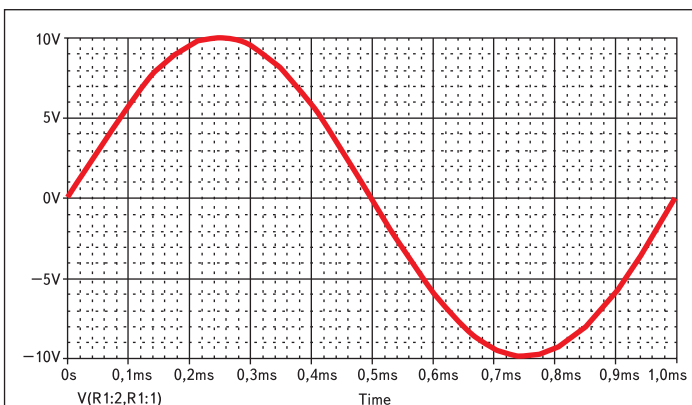
(точное значение этого напряжения в точке 0,3 мс принято равным 9,51351) и погрешность вычисления изображения синусоидального напряжения, полученного при моделировании.



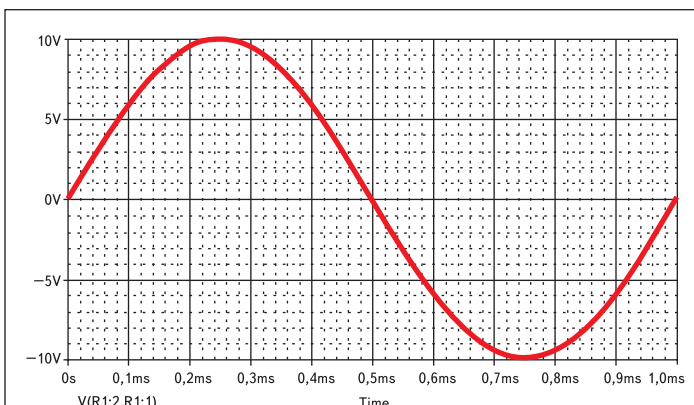
**Рис. 9.** Осциллограмма напряжения на резисторе (схема на рис. 8) для  $TSTOP = 20$  мс



**Рис. 10.** Осциллограмма напряжения на резисторе (схема на рис. 8) для  $TSTOP = 10$  мс



**Рис. 11.** Осциллограмма напряжения на резисторе (схема на рис. 8) для  $TSTOP = 5$  мс



**Рис. 12.** Осциллограмма напряжения на резисторе (схема на рис. 8) для  $TSTOP = 1$  мс



Рис. 13. Цифровая осциллограмма работы источника DIG CLOCK

Таким образом, для сигналов известной формы вид их изображения на осциллограмме может служить напоминанием о точности проводимых вычислений.

### Источники питания и сигналов

Для моделирования источников питания и сигналов в библиотеке SOURCE представлены следующие источники:

- 1) DIG CLOCK — цифровой источник со следующими свойствами:
  - OFFTIME — время перехода из состояния 1 в состояние 0;
  - ONTIME — время перехода из состояния 0 в состояние 1;
  - DELAY — время задержки;
  - STARTVAL — начальное значение (0, 1);
  - OPPVAL — конечное значение (0, 1).

На рис. 13 приведена цифровая осциллограмма работы источника DIG CLOCK со следующими свойствами: OFFTIME = 0,2 мкс, ONTIME = 0,3 мкс, DELAY = 0,1 мкс, STARTVAL = 0, OPPVAL = 1.

В библиотеке source.lib имеются модификации цифрового источника DIG CLOCK, которые также имеют обозначение DSTM? и представляют собой частные случаи источника DIG CLOCK, которые получаются при фиксации некоторых из перечисленных выше свойств. Описание этих источников и их функционирование дальнейших пояснений не требует.

- 2) IAC — источник синусоидального переменного тока, используемый только для анализа по переменному току (AC Sweep). Имеет 2 свойства:

- Aac — амплитуда синусоиды тока;
- Adc — постоянная составляющая тока.

Кроме этого, источник IAC имеет скрытое свойство ACPHASE. Данному свойству необходимо присвоить значение начальной фазы синусоиды источника. По умолчанию значение этого свойства равно нулю. Свойство становится доступным после щелчка правой кнопкой мыши по графическому изображению источника IAC и выбора пункта Edit Properties.

- 3) IDC — источник постоянного тока. Имеет одно свойство:

- Adc — значение постоянного тока.

- 4) IEXP — источник экспоненциального тока [3]. Имеет шесть свойств:

- I1 — начальное значение тока;
- I2 — максимальное значение тока;
- TD1 — задержка момента нарастания тока;
- TC1 — постоянная времени нарастания тока;
- TD2 — задержка момента спада тока;
- TC2 — постоянная времени спада тока.

На рис. 14 приведена осциллограмма работы источника IEXP со следующими свойствами:

I1 = 1, I2 = 5, TD1 = 1, TC1 = 0, TD2 = 2, TC2 = 0,5.

- 5) IPULSE — источник импульсного тока. Имеет семь свойств:

- I1 — начальное значение тока;
- I2 — конечное значение тока;
- TD — время задержки;
- TR — время переднего фронта;
- TF — время заднего фронта;
- PW — длительность импульса;
- PER — период повторения.

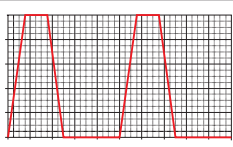
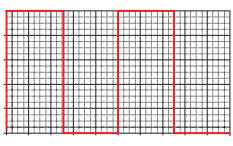
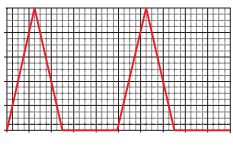
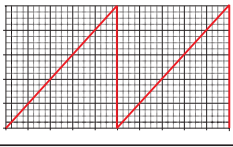
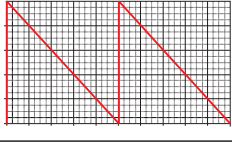
Источник типа IPULSE в зависимости от значений перечисленных свойств дает возможность формирования достаточно большого количества сигналов. Часть из этих сигналов и соответствующих им свойств приведена в таблице 6.

Данные сигналы могут быть модифицированы при значениях  $I1 = a$ ,  $I2 = b$ , причем могут быть рассмотрены случаи как  $a > b$ , так и  $a < b$ . Если  $a < b$ , то сигнал вместо диапазона  $[0, 100]$  будет лежать в диапазоне  $[a, b]$  по оси ординат. В случае  $a > b$  сигнал будет лежать в том же диапазоне по оси ординат, но сдвинется вправо до ближайшего значения  $b$  по оси абсцисс.

Приведенные выше однополярные сигналы легко преобразуются в двухполярные симметричные относительно оси времени при замене параметра  $I1 = 0$  на параметр  $I1 = -I2$  и несимметричные двухполярные при замене этого параметра на  $I1 = -kI2$ , где  $k > 0$ . В случае  $I1 = kI2$ , где  $k > 0$ , получаются импульсы, расположенные выше оси времени.

Многообразие сформированных сигналов может быть существенно увеличено за счет ком-

Таблица 6. Однополярные сигналы и соответствующие им свойства источника IPULSE

Сигнал	Параметры
	I1=0 I2=100 TD=0 TR=150μ TF=150μ PW=200μ PER=1000μ
	I1=0 I2=100 TD=0 TR=1n TF=1n PW=500μ PER=1000μ
	I1=0 I2=100 TD=0 TR=250μ TF=250μ PW=1n PER=1000μ
	I1=0 I2=100 TD=0 TR=999μ TF=1n PW=1n PER=1000μ
	I1=0 I2=100 TD=0 TR=1n TF=999μ PW=1n PER=1000μ

бинаций включения источников. Один из примеров таких комбинаций приведен на рис. 15.

На рис. 16 приведена осциллограмма тока через нагрузку.

Возможности получения сигналов путем назначения различных значений свойств источников очевидны и здесь подробнее не рассматриваются.

- 6) IPWL — кусочно-линейный источник тока.

Имеет вектор свойств  $\{t_j; i_j\}$ , где  $(t_j; i_j)$  — координаты  $i$ -й точки в осях «ток-время»,

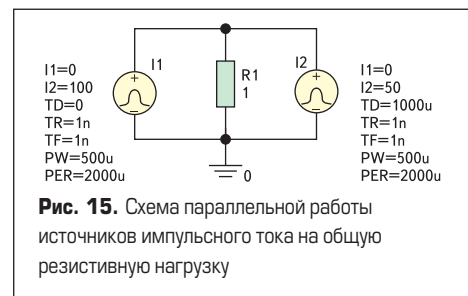


Рис. 15. Схема параллельной работы источников импульсного тока на общую резистивную нагрузку

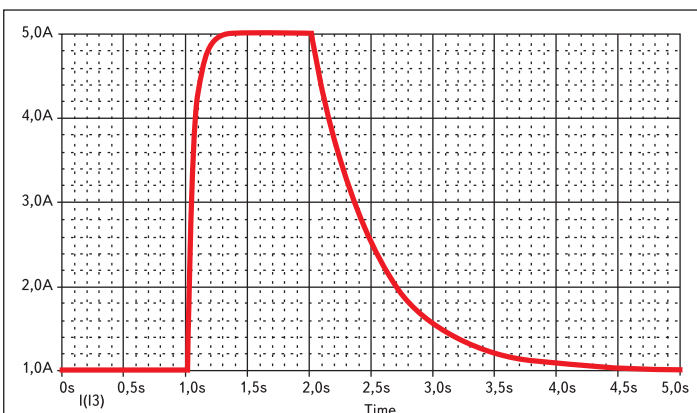


Рис. 14. Осциллограмма работы источника IEXP

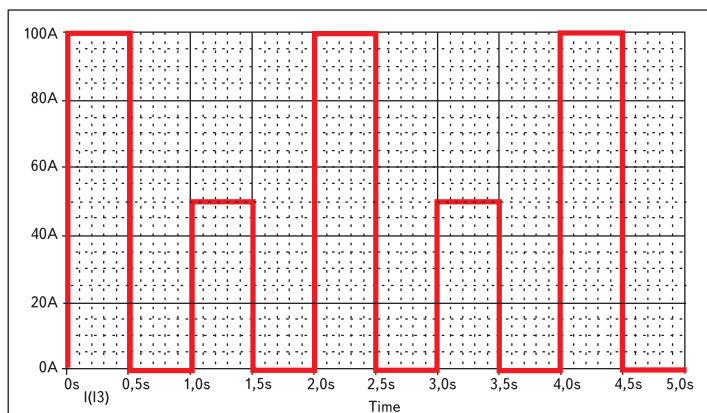


Рис. 16. Осциллограмма тока через нагрузку



$0 < i < N$ , где  $N$  задается пользователем. Результирующая форма тока получается в результате последовательного соединения точек с соответствующими координатами отрезками прямых.

На рис. 17 приведен пример [3] работы кусочно-линейного источника тока на резистивную нагрузку сопротивлением 1 Ом при следующих свойствах:  $N = 6$ ,  $t_1 = 0$ ,  $i_1 = 0$ ,  $t_2 = 1$ ,  $i_2 = 0$ ,  $t_3 = 1,2$ ,  $i_3 = 5$ ,  $t_4 = 1,4$ ,  $i_4 = 2$ ,  $t_5 = 2$ ,  $i_5 = 4$ ,  $t_6 = 3$ ,  $i_6 = 1$ .

В библиотеке source.lib имеются модификации источника IPWL, которые имеют такое же обозначение и представляют собой частные случаи источника IPWL, которые получают при конкретных значениях вектора свойств. Описание этих источников и их функционирование дальнейших пояснений не требует.

7) ISIN — источник синусоидального тока, используемый только для анализа переходных процессов (Transient Analysis). Имеет три свойства:

- IOFF — постоянная составляющая тока;
- IAMPL — амплитуда синусоиды;
- FREQ — частота.

Кроме этого, источник ISIN имеет два скрытых свойства PHASE и DF. Свойству PHASE необходимо присвоить значение начальной фазы синусоиды источника. Свойству DF необходимо присвоить значение коэффициента затухания. По умолчанию значения этих свойств равны нулю. Свойства становятся доступными после щелчка правой кнопкой мыши по графическому изображению источника ISIN и выбора пункт Edit Properties.

8) ISFFM — источник синусоидального тока с частотной модуляцией, используемый только для анализа переходных процессов (Transient Analysis). Имеет пять свойств:

- IOFF — постоянная составляющая тока;
- IAMPL — амплитуда синусоиды;

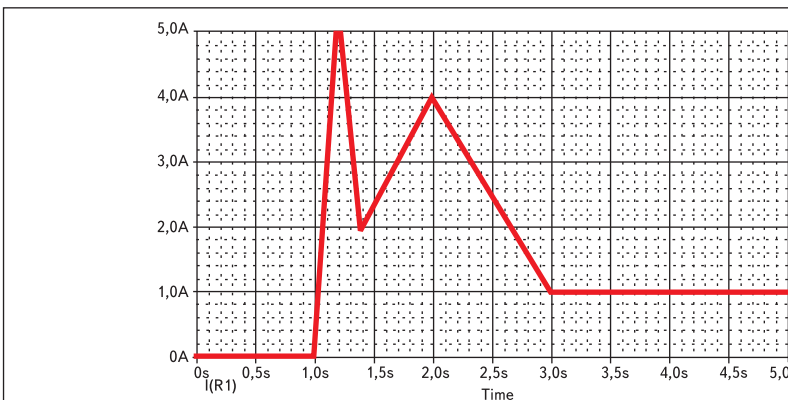


Рис. 17. Пример работы кусочно-линейного источника тока на резистивную нагрузку

- FC — частота несущей;
- MOD — индекс частотной модуляции;
- FM — частота модуляции.

Изменение тока источника ISFFM осуществляется в соответствии с формулой:

$$I = IOFF + IAMPL \times \sin(2\pi \times FC \times Time + MOD \times \sin(2\pi \times FM \times Time)),$$

где Time — текущее время.

9) ISRC — источник переменного тока для анализа шумов. Имеет три свойства:

- Aac — амплитуда синусоиды тока;
- Adc — постоянная составляющая тока;
- TRAN — значение начального приближения при переходном процессе.

Вторая часть библиотеки source.lib полностью аналогична описанным выше источникам тока и отличается лишь тем, что в ней приведены источники напряжения. Все свойства этих источников аналогичны свойствам источников тока и могут быть получены из приведенного описания заменой термина «ток»

на термин «напряжение» (в обозначениях производится замена буквы I на V).

Следует, однако, помнить, что одним из основных отличий источника идеального тока от источника идеального напряжения является то, что первый имеет внутреннее сопротивление, равное бесконечности, а второй — равное нулю. Поэтому допустимы только параллельное включение источников идеального тока и только последовательное включение источников идеального напряжения.

#### Литература

1. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2 // Силовая Электроника. 2004. № 1.
2. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга». М.: «СОЛОН-Пресс». 2005.
3. PSpice Reference Guide. Product version 9.2. Cadence Design System, Inc.