

# ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ LTSPICE, часть 3

В третьей части статьи кратко рассмотрены основные параметры неидеальных источников тока и ключей, управляемых током и напряжением. Рассмотрены примеры применения каждого из устройств в различных режимах.

В. Макаренко

В первых двух частях статьи рассмотрены методы настройки параметров и некоторые источники сигналов программы. Рассмотрим другие источники сигналов библиотеки LTspice.

Неидеальный источник тока **Load** (рис. 1).

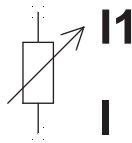


Рис. 1. Обозначение на схеме неидеального источника тока Load

Это – неидеальный источник постоянного тока между узлами n1 и n2. При уменьшении напряжения до нуля и переходе в отрицательную область, ток также падает до нуля. Такой вариант предназначен для моделирования источника питания для тех случаев, когда его мощности не хватает для поддержания постоянства тока при режимах, близких к короткому замыканию.

При работе элемента **Load** в качестве простого источника постоянного тока достаточно задать величину тока в окне, которое открывается при наведении указателя на элемент и нажатия правой кнопки "мышки" (рис. 2).

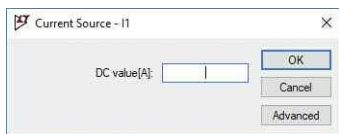


Рис. 2. Окно установки значения постоянного тока, формируемого элементом Load

Однако, при нажатии кнопки **Advanced** (рис. 2) открывается меню с дополнительными параметрами источника тока, показанное на рис. 3. Элемент

## THE SOFTWARE FOR MODELING ELECTRONIC CIRCUITS LTSPICE, part 3

Abstract – The third part of the article briefly describes the main parameters of non-ideal current sources, keys controlled by current and voltage. Examples of application of each device in different modes are considered.

V. Makarenko

**Load** может использоваться как источник переменного (AC), импульсного (PULSE), гармонического (SINE) и экспоненциального (EXP) токов, ЧМ-сигнала (SFFM), а также для формирования сигналов произвольной формы (PWL) и Table, параметры которых задаются пользователем.

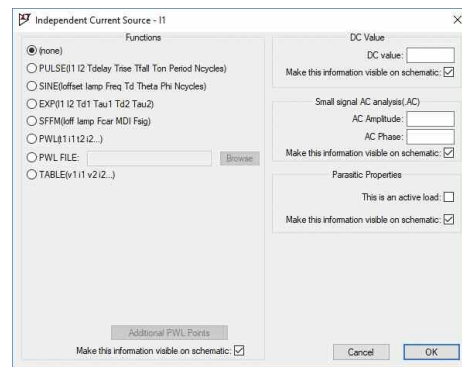


Рис. 3. Окно выбора режима работы элемента Load

Для частотного анализа в режиме малого сигнала задается амплитуда (**AC Amplitude**) и фаза (**AC Phase**). При необходимости задается постоянная составляющая тока. Такой режим не требует каких-либо дополнительных пояснений.

### Режим импульсного источника тока Pulse

Синтаксис: **Ixxx n1 n2 PULSE (I1 I2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)**

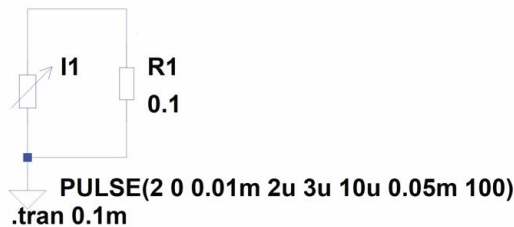
Параметры импульсного источника тока приведены в табл. 1.

\* В табл. 1 и других таблицах наименование параметров приведено в двух вариантах: как указано в подсказке к программе (обозначение в скобках) и как указано в окне установки параметров источника тока для различных режимов работы. Там, где обозначения совпадают, указано одно обозначение.

**Таблица 1. Параметры импульсного источника тока**

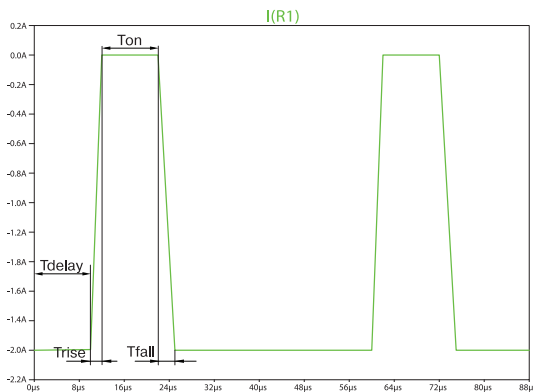
Наименование	Параметр
I1 (Ioff), A	начальная величина тока
I2 (Ion), A	амплитуда тока импульса
Tdelay, c	задержка начала импульса
Trise (Tr), c	длительность фронта импульса
Tfall (Tf), c	длительность спада импульса
Ton, c	время, в течении которого поддерживается максимальное значение тока
Period (Tperiod), c	период следования импульсов
Ncycles	число импульсов

На рис. 4 приведен пример реализации генератора импульсного тока со следующими параметрами:  $I_1 = 2 \text{ A}$ ,  $I_2 = 0 \text{ A}$ ,  $T_{\text{delay}} = 10 \text{ мс}$ ,  $T_{\text{rise}} = 2 \text{ мкс}$ ,  $T_{\text{fall}} = 3 \text{ мкс}$ ,  $T_{\text{on}} = 10 \text{ мкс}$ ,  $\text{Period} = 0.05 \text{ мс}$ ,  $N_{\text{cycles}} = 10$ .



**Рис. 4. Генератор импульсов тока**

Форма тока в нагрузке приведена на рис. 5. Как следует из рисунка, на выходе формируется импульс тока отрицательной полярности. Если поменять местами значение токов I1 и I2, то фаза сигнала изменится на противоположную.

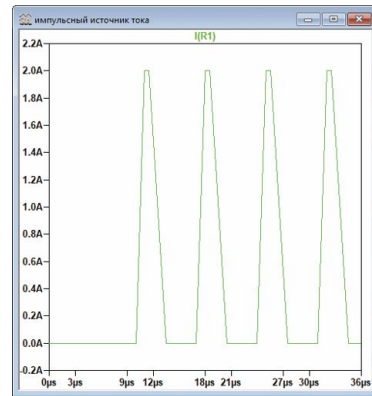


**Рис. 5. Форма тока в нагрузке при формировании импульсов тока отрицательной полярности**

Для формирования положительного импульса тока необходимо задать отрицательную величину I2, а ток I1 задать равным нулю. Тогда командная строка примет вид

**PULSE(0 -2 0.01m 1u 2u 0.5u 7u 10).**

Форма тока, формируемого в нагрузке, показана на рис. 6.



**Рис. 6. Форма тока в нагрузке при формировании импульсов тока положительной полярности PULSE(0 -2 0.01m 1u 2u 0.5u 7u 10)**

**Режим гармонического источника тока SINE**

Синтаксис: **Ixxx n1 n1 SINE(DC offset Amplitude Freq Td Theta Phi Ncycles)**

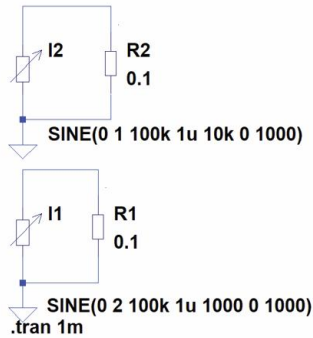
Параметры гармонического источника тока приведены в табл. 2. На рис. 7 приведена модель для формирования экспоненциально спадающего тока. Следует учесть, что при значении коэффициента Theta равным нулю генератор тока формирует гармонический сигнал. Влияние коэффициента Theta на форму тока иллюстрирует рис. 8.

**Таблица 2. Параметры гармонического источника тока**

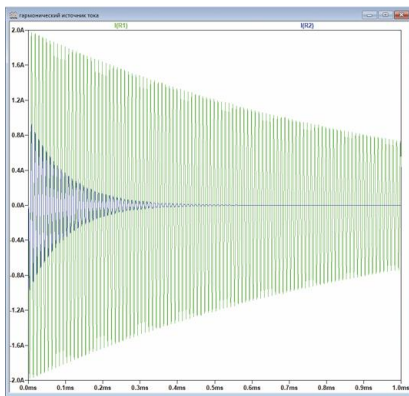
Наименование	Параметр
DC offset (Ioffset), A	смещение по пост току
Amplitude (Iamp), A	амплитуда тока
Freq, Гц	частота сигнала
Tdelay (Td), c	задержка
Theta	коэффициент затухания
Phi, градусы	начальная фаза сигнала
Ncycles	число импульсов

Меняя число формируемых циклов, можно создавать с помощью источника Load радиоимпульсы сложной формы. В подсказке к программе и [1] при-

ведены соотношения для определения закона изменения тока во времени.



**Рис. 7. Модель для формирования экспоненциально спадающего гармонического сигнала**



**Рис. 8. Огибающая тока гармонического сигнала при значении коэффициента Theta = 1000 (зеленая) и при Theta = 10000 (синяя)**

Для моментов времени меньших, чем Td или после завершения Ncycles, ток вычисляется по формуле

$$I_{offset} + I_{amp} \sin(\pi \Phi / 180).$$

где  $I_{offset}$  – смещение по пост току,  $I_{amp}$  – амплитуда тока.

Для других интервалов времени ток определяется по формуле

$$I_{offset} + I_{amp} \exp(-(t - T_d) \Theta) \cdot \sin(2\pi \text{Freq} (t - T_d) + \pi \Phi / 180).$$

**Режим экспоненциального источника тока EXP**  
Синтаксис: `Ixxx n1 n2 Ixxx n1 n2 EXP(I1 I2 Fail Delay Fail Tau Rise Delay Rise Tau)`.

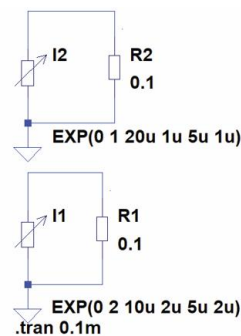
Параметры экспоненциального источника тока описаны в табл. 3. Следует отметить, что в подсказке к программе и в [1,2] параметры командной

строки указаны неверно. Параметры фронта и спада указаны наоборот. Скорее всего, они соответствуют старой версии программы.

**Таблица 3. Параметры экспоненциального источника тока**

Наименование	Параметр
Vinitial (I1), A	начальная величина тока
Vpulsed (I2), A	амплитуда импульса
Fail Delay (Td2), c	время задержки начала спада
Fail Tau (Tau2), c	постоянная времени спада
Rise Delay (Td1), c	время задержки появления фронта
Rise Tau (Tau1), c	постоянная времени фронта

Для иллюстрации работы экспоненциального источника тока использована модель, показанная на рис. 9. Диаграммы токов, формируемых источниками I1 и I2, приведены на рис. 10. Временная диаграмма тока I2 хорошо иллюстрирует параметры командной строки. Из рис. 10 следует, что импульс I2 начинается через 5 мкс, а спад – через 20 мкс. Длительность фронта и спада установлены равными примерно 3 мкс (постоянная времени фронта и спада равны 1 мкс).

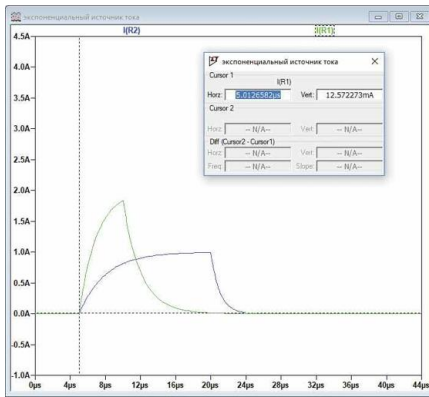


**Рис. 9. Модель для иллюстрации работы экспоненциального источника тока**

Для моментов времени меньших, чем Rise Delay, выходной ток равен значению I1. Фронт импульса описывается выражением

$$I = I_1 + (I_2 - I_1) (1 - \exp(-(t - \text{Rise Delay}) / \text{Rise Tau})),$$

а спад



**Рис. 10. Форма сигналов, формируемых источником тока I1 (зеленый) и I2**

$$I = I_1 + (I_2 - I_1) (1 - \exp(-(t - \text{Rise Delay})/\text{Rise Tau})) + (I_1 - I_2) (1 - \exp(-(t - \text{Fail Delay})/\text{Fail Tau})),$$

где t – текущее время.

**Режим частотно-модулированного источника тока SSFM**

Синтаксис:

$$\text{Ixxx n1 n2 SSFM(Ioff Iamp Fcar MDI Fsig)}$$

Параметры частотно-модулированного источника тока приведены в табл. 4.

**Таблица 4. Параметры частотно-модулированного источника тока**

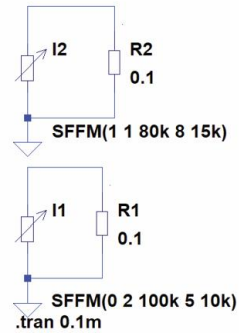
Наименование	Параметр
DC offset (Ioff), A	смещение по постоянному току
Amplitude (Iamp), A	амплитуда тока
Carrier Freq (Fcar), Гц	частота несущего колебания
Modulation Index (MDI)	индекс модуляции
Signal Freq (Fsig), Гц	частота модулирующего сигнала

Модель с двумя источниками тока, работающими в режиме SSFM приведена на рис. 11.

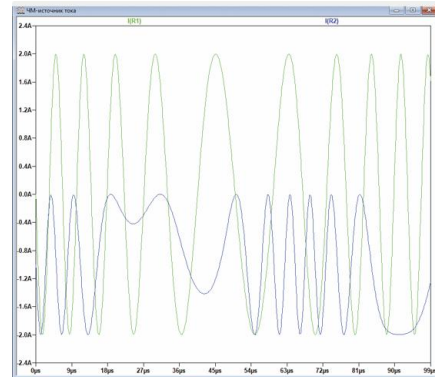
Формы токов I1 и I2 приведены на рис. 12, а спектр тока I1 – на рис. 13. Параметры ЧМ-сигналов указаны на рис. 11 в командных строках для каждого из источников тока. В источнике I2 задана постоянная составляющая равная 1 А, что хорошо видно на рис. 12.

Закон изменения тока определяется выражением

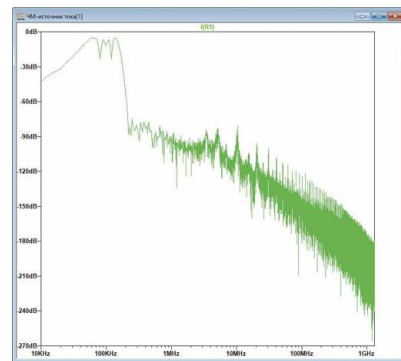
$$I_{\text{off}} + I_{\text{amp}} \sin((2\pi F_{\text{car}} t) + \text{MDI} \cdot \sin(2\pi F_{\text{sig}} t)).$$



**Рис. 11. Модель для формирования ЧМ-сигналов**



**Рис. 12. Форма ЧМ-сигналов источника тока I1 (зеленый) и I2**



**Рис. 13. Спектр ЧМ-сигнала источника тока I1**

**Режим источника тока, заданного табличной функцией PWL(t1 i1 t2 i2 ...)**

В этом режиме формируется ток, изменяющийся на заданную величину в дискретные моменты времени. На рис. 14 приведена модель для иллюстрации этого режима работы, а на рис. 15 – форма тока, протекающего через нагрузочный резистор R1.

Синтаксис: **Ixxx n1 n1 PWL(t1 i1 t2 i2 t3 i3...)**

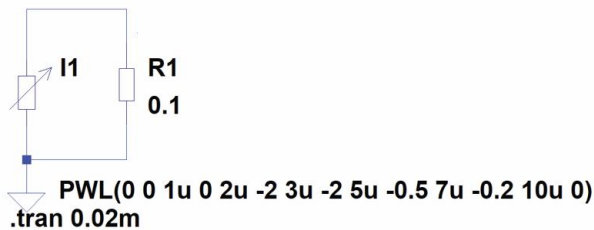


Рис. 14. Модель источника тока, заданного табличной функцией

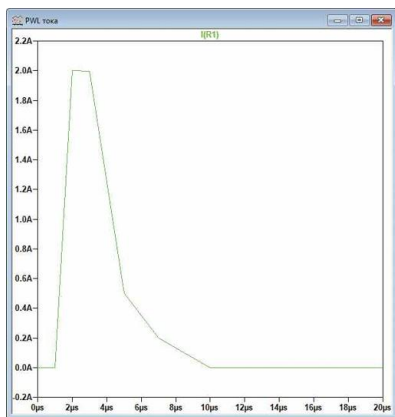


Рис. 15. Форма тока в нагрузке для модели, приведенной на рис. 14

До момента времени  $t_1$ , ток источника равен  $i_1$ . В моменты между  $t_1$  и  $t_2$ , ток изменяется линейно от  $i_1$  до  $i_2$ . Можно указать любое число моментов времени и соответствующих значений тока. На интервале времени за последней заданной точкой ток сохраняет свое последнее значение.

**Режим источника тока, заданного wav-файлом (звуковым файлом)**

Синтаксис:

**Ixxx n1 n2 wavefile=<имя файла> [chan=<nnn>].**

В этом режиме LTspice позволяет использовать wav-файл (файл с расширением wav) как источник входного токового сигнала. Если wav-файл находится в директории LTspice, то достаточно указать только его имя. Если wav-файл находится в другом месте, то требуется указать полное имя, содержащее абсолютный путь к файлу. Имя файла следует заключить в двойные кавычки, если в нем или пути присутствуют пробелы. Файл может содержать от 0 до 65 536 каналов. В параметре **chan** необходимо задать используемый канал. По умолчанию используется первый (левый) канал, имеющий номер 0. Канал номер 1 соответствует правому каналу на вы-

ходе звуковой карты ПК. Полный размах токового сигнала, записанного в wav-файл, лежит в диапазоне от -1 до 1 А.

Для иллюстрации этого режима создадим звуковой сигнал с помощью источника тока и запишем его в файл. Для этого используем модель, показанную на рис. 16.

**.WAVE n:\output1.wav 16 44.1K V(1)**

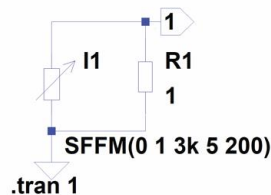


Рис. 16. Модель для формирования и записи звукового файла

Для записи сформируем ЧМ-сигнал с несущей частотой 3 кГц и частотой модулирующего сигнала 200 Гц. В соответствии с рекомендациями [2] командная строка для создания звукового файла будет выглядеть следующим образом

**.WAVE n:\output1.wav 16 44.1K V(1).**

В этой строке:

- .WAVE – команда для создания файла с расширением wav
- n:\output1.wav – путь и имя сохраняемого файла
- 16 – число разрядов квантования при аналого-цифровом преобразовании
- 44.1K – частота дискретизации
- V(1) – точка (узел) схемы с которой снимается звуковой сигнал (рис. 16).

Для создания этой команды необходимо нажать на пиктограмму **Text** на панели управления программы и в открывшемся окне **Edit Text on the Schematic** (рис. 17) ввести необходимые записи. Следует отметить этот текст как **Spice directive**, иначе он будет восприниматься программой как комментарий и не вызовет никаких действий. Аналогичную процедуру можно проделать, нажав самую кнопку на панели управления **SPICE Directive**, которая находится правее кнопки **Text**.

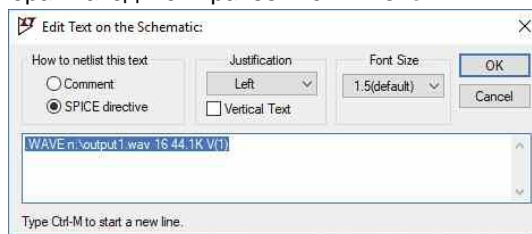


Рис. 17. Окно Edit Text on the Schematic

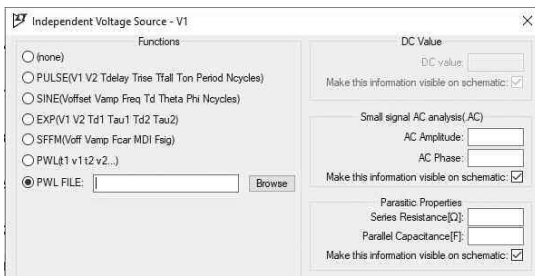
Записанный файл output1.wav для контроля был воспроизведен и прослушан с помощью музыкального проигрывателя Windows.

При создании звукового файла допускается задавать число разрядов квантования в диапазоне от 1 до 32. Частота дискретизации может задаваться в диапазоне от 1 Гц до 4 294 967 295 Гц, а число узлов схемы – от 1 до 65 535. При этом для каждого узла схемы создается независимый канал в wav-файле.

Следует помнить, что диапазон преобразуемых в цифровой код значений тока сигнала лежит в диапазоне  $\pm 1$  А или  $\pm 1$  В в зависимости от того какой параметр преобразуется.

Чтобы можно было прослушать записанные файлы с помощью звуковой карты ПК необходимо чтобы частота дискретизации была равна одному из указанных значений 11.025, 22.05 или 44.1 кГц. Эти частоты поддерживаются любыми звуковыми картами. Если звуковая карта вашего ПК поддерживает частоты 48, 96 и 192 кГц, то их тоже можно задавать. Число каналов следует задавать не более двух.

Чтобы воспроизвести wav-файл необходимо в источнике тока или напряжения выбрать режим **PWL FILE**, после чего станет активной кнопка **BROWSE** (рис. 18). После нажатия на нее откроется окно с директорией в которой находится файл модели LTspice.



**Рис. 18. Окно выбора режима работы с wav-файлом**

Чтобы найти wav-файл необходимо открыть директорию, в которой записан звуковой файл, и в нижней правой части окна выбрать режим **All Files** (\*. \*). По умолчанию установлен режим **ASCII Files** (\*.txt), как показано на рис. 19. После выбора файла на рабочем листе схемы появится командная строка **PWL file="Звук 1.wav"**, где **Звук 1** – имя звукового файла, выбранного для проверки работы в этом режиме. В качестве звукового файла выбран фрагмент песни одного из эстрадных исполнителей.

Для того, чтобы программа смогла воспроизвести форму сигнала этого файла и не появилось со-



**Рис. 19. Фрагмент окна поиска wav-файла**

общение об ошибке, необходимо отредактировать командную строку и заменить текст **PWL file** на **wavfile** (рис. 20).

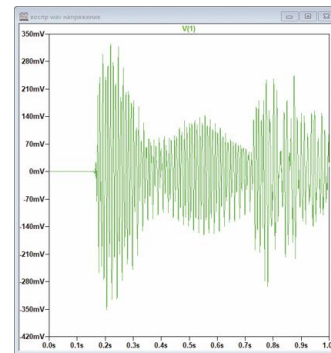
```

1
V1
.
.
.
.tran 1
wavfile="Звук 1.wav"

```

**Рис. 20. Схема модели для воспроизведения формы сигнала, записанного в звуковом файле**

Номер канала можно не указывать. По умолчанию будет воспроизводиться левый канал. Форма напряжения на выходе генератора V1 показана на рис. 21. Воспроизводится только отрезок длительностью 1 с. При необходимости изменить длительность фрагмента нужно отредактировать время в строке **.tran 1**.



**Рис. 21. Форма сигнала во время воспроизведения первой секунды звукового файла**

#### Режим источника тока, зависящего от приложенного напряжения

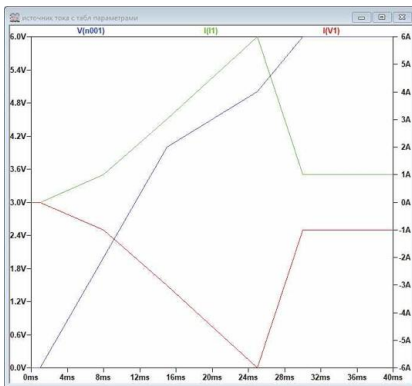
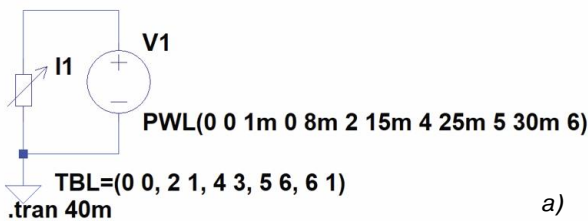
Этот источник тока используется для имитации изменяющейся нагрузки источника питания. Фактически в этом режиме источник тока выполняет функцию резистора, сопротивление которого изменяется по закону, заданному в табличной форме.

Синтаксис: **Ixxx n1 n2 tbl=( $\langle$ напряжение 1 ток 1 $\rangle$ ,  $\langle$ напряжение 2 ток 2 $\rangle$ , ...).**

Таблица состоит из списка пар значений. Первое значение пары указывает напряжение, приложенное к источнику тока, а второе значение указывает ток, соответствующий приложенному напряжению. Между указанными табличными значениями нагрузочные параметры линейно интерполируются. Если напряжение выходит за пределы, определенные таблицей, то ток фиксируется на последнем значении.

На рис. 22,а приведена схема модели для демонстрации изменения тока при изменении напряжения, заданного табличной функцией. Для формирования изменяющегося во времени напряжения использован источник напряжения. На рис. 22,б приведены временные диаграммы токов и напряжений в различных точках схемы.

При создании такой модели необходимо помнить, что каждое последующее значение напряжения должно быть больше предыдущего.

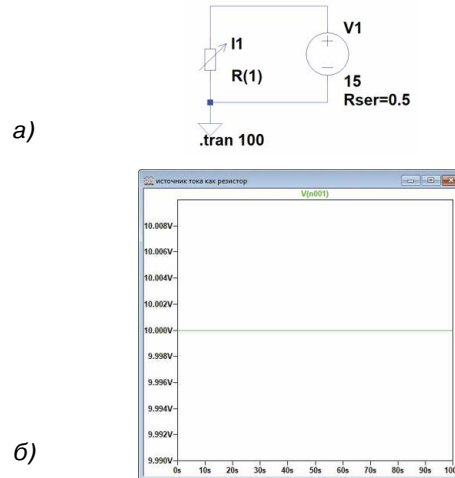


**Рис. 22. Модель для демонстрации работы источника тока, зависящего от приложенного напряжения (а) и временные диаграммы токов и напряжений в различных точках схемы (б)**

Для преобразования источника тока в резистор следует воспользоваться следующим текстовым синтаксисом: **Ixxx n1 n2 R=<значение>**.

На рис. 23,а приведен пример использования элемента **Load** в качестве резистора, а на рис. 23,б напряжение на выходе источника V1. Учитывая, что

внутреннее сопротивление источника напряжения задано 0.5 Ом, а сопротивление нагрузки 1 Ом, то напряжение на выходе источника питания должно составлять 10 В, что и подтверждает рис. 23,б.



**Рис. 23. Модель иллюстрирующая использование источника тока в качестве резистора (а) и напряжение на выходе источника V1 (б)**

**Неидеальный источник тока Load2**

Обозначение источника на схеме приведено на рис. 24.

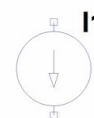


**Рис. 24. Обозначение на схеме неидеального источника тока Load2**

Источник тока Load2 по всем параметрам соответствует источнику тока Load1.

**Неидеальный источник тока Current**

Обозначение источника на схеме приведено на рис. 25.

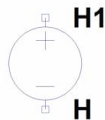


**Рис. 25. Обозначение независимого источника тока Current**

Источник тока **Current** имеет другое обозначение (по сравнению с источником **Load2**), но поддерживает все функции источников тока **Load** и **Load2**. Чтобы превратить источник тока **Current** в нагрузку, нужно отметить в области **Parasitic Properties** (рис. 3) галочкой пункт **This is an active load** (нагрузка). В отличие от обычного источника тока, нагрузка потребляет указанный ток только в том случае, если к ней приложено положительное напряжение больше нуля (плюс к n1, минус к n2). В случае отрицательного или нулевого напряжения ток не потребляется.

**Линейный источник напряжения, зависящий от тока (Linear current dependent voltage source)**

Эта модель существует в системе LTSpice, но не поддерживается графическим пользовательским интерфейсом [3]. На схеме обозначается как H (рис. 26).

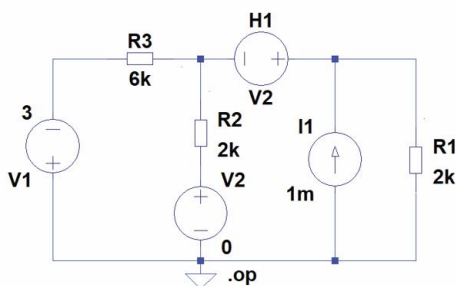


**Рис. 26. Обозначение линейного источника напряжения, зависящего от тока**

Синтаксис: **Hxxx n1 n1 VNAME VALUE.**

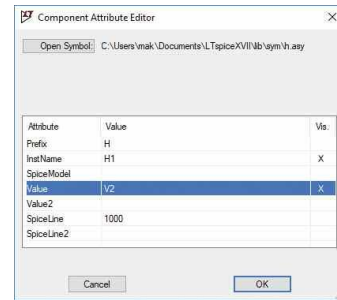
В этой строке **VNAME** – источник напряжения, от тока которого зависит напряжение на выходе источника H, **VALUE** – коэффициент передачи (преобразования).

На рис. 27 приведен пример схемы [3], в которой используется такой источник напряжения, а на рис. 28 – окно установки параметров.

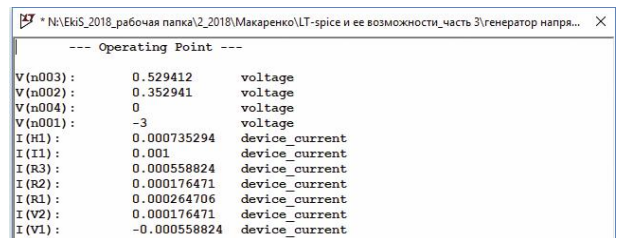


**Рис. 27. Схема с использованием источника напряжения, зависящего от тока**

Результат работы этой модели приведен на рис. 29. Это значения рассчитанных токов и напряжений в различных узлах схемы. Подробнее об этом элементе можно прочесть в [3].



**Рис. 28. Окно установки параметров источника напряжения, зависящего от тока**



**Рис. 29. Результаты моделирования схемы, приведенной на рис. 27**

**Ключ, управляемый током**

Обозначение ключа на схеме приведено на рис. 30.

W1

CSW

**Рис. 30. Обозначение ключа, управляемого током**

Синтаксис:

**Wxxx n1 n2 Vnam <имя модели> [on,off].**

Ток через источник напряжения с именем Vnam управляет сопротивлением ключа. Обязательно указывается имя модели, которое определяет поведение ключа.

Параметры ключа, управляемого током:

- **It** – пороговый ток (по умолчанию равен 0)
- **Ih** – ток гистерезиса (по умолчанию равен 0)
- **Ron** – сопротивление замкнутого ключа (по умолчанию равно 1 Ом)
- **Roff** – сопротивление разомкнутого ключа (по умолчанию равно 1/Gmin).

По умолчанию в Ltspice Gmin = 10<sup>-12</sup> См, т.е. сопротивление разомкнутого ключа по умолчанию 10<sup>12</sup> Ом.

Ключ имеет три разных режима управления, в зависимости от значения тока гистерезиса **Ih**. Если **Ih**

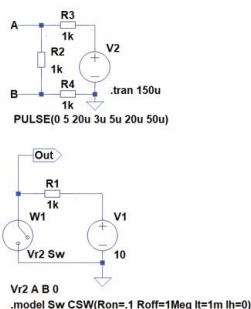


равен нулю ключ замкнут при величине тока превышающей значение  $I_t$ .

Если  $I_h$  больше нуля, то ключ работает как триггер Шмитта с точками переключения при токах  $I_t+I_h$  и  $I_t-I_h$ .

Если  $I_h$  меньше нуля, ключ срабатывает с плавным изменением собственного сопротивления от минимального до максимального (и наоборот). Изменение сопротивления происходит в интервале времени, на котором ток управления изменяется от  $I_t+I_h$  до  $I_t-I_h$ .

На рис. 31 приведена модель для иллюстрации работы ключа, управляемого током, при отсутствии гистерезиса.



**Рис. 31. Модель для иллюстрации работы ключа, управляемого током**

В качестве датчика тока используется резистор R2. Выводы резистора помечены точками **A** и **B**, а выход ключа – как **Out**. В этой модели ток, формируемый импульсным генератором V2, протекает через делитель, состоящий из резисторов R2...R4. Ток срабатывания ключа установлен равным 1 мА.

Для того, чтобы модель начала работать необходимо ввести обозначения (имена) для датчика тока и для ключа. Под этими именами будут описаны параметры датчика тока и ключа. В модели на рис. 31 для датчика тока принято обозначение **Vr2**, а для ключа – **Sw**.

Установив курсор на значке ключа, необходимо нажать правую кнопку "мыши" и в открывшемся окне в поле "Value" вписать **Vr2 Sw** (на рис. 31 такое обозначение находится рядом со значком **W1**). После этого необходимо разместить на рабочем поле две директивы – описание параметров датчика тока и модель ключа.

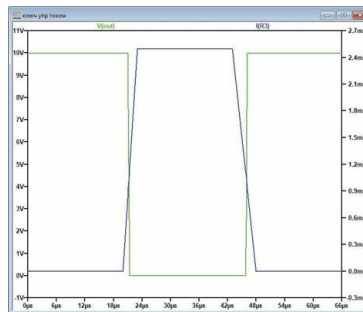
Для создания директивы описания параметров датчика тока достаточно нажать кнопку **SPICE Directive** (крайняя правая в панели управления) и в открывшемся окне вписать текст **Vr2 A B 0**. При такой записи сопротивление датчика тока равно нулю (последняя цифра в директиве) и сопротивление

делителя будет равно 2 кОм.

Создание директивы с описанием модели ключа осуществляется аналогично. Директива должна иметь следующий вид

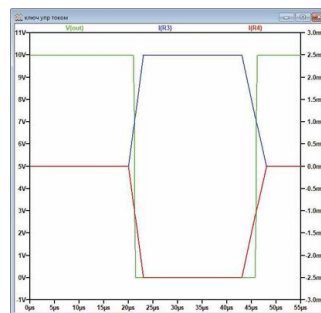
**.model Sw CSW(Ron=.1 Roff=1Meg It=1m Ih=0)**

Результаты работы модели приведены на рис. 32.



**Рис. 32. Временные диаграммы напряжения на выходе ключа (зеленая) и тока через резистор R3**

При работе с датчиком тока в такой схеме наблюдаются несколько непривычные явления. Казалось бы, что ток через резисторы R3 и R4 одинаков как по величине, так и по направления. Однако это не так. На рис. 33 показаны временные диаграммы выходного напряжения и токов через эти резисторы.



**Рис. 33. Временные диаграммы токов через резистор R3 (синяя) и через R4 (красная)**

Как следует из результатов моделирования токи через резисторы R3 и R4 имеют противоположное направление, а по абсолютной величине равны 2.5 мА. При амплитуде импульса генератора V2 равной 5 В это соответствует сопротивлению делителя равному 2 кОм.

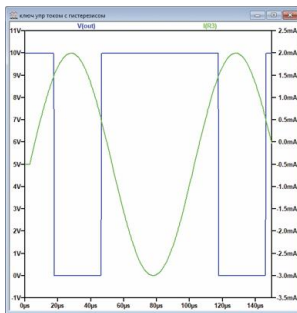
Если в директиве описания датчика тока вписать значение сопротивления ключа равное 1 кОм или 1 Ом, то ключ перестанет работать, хотя через делитель будет протекать ток больше чем 1 мА. Поэтому всегда в директиве в конце должен стоять ноль,

а сопротивление датчика может быть задано произвольно, например, 100 МОм (величину следует указывать как 100Meg).

Если ввести гистерезис 0.5 мА, то директива примет вид

**.model Sw CSW(Ron=.1 Roff=1Meg It=1m lh=0.5m)**

Для иллюстрации работы схемы с гистерезисом генератор импульсов заменен на генератор гармонического сигнала. Временные диаграммы тока через резистор R3 и напряжения на выходе ключа при введении гистерезиса приведены на рис. 34.

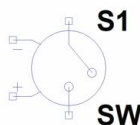


**Рис. 34. Временные диаграммы тока через резистор R3 (зеленая) и напряжения на выходе ключа при введении гистерезиса**

Следует заметить, что для изменения фазы сигнала управления ключом на противоположную достаточно поменять местами значения параметров **Ron** и **Roff**.

**Ключ, управляемый напряжением SW**

На рис. 35 приведено обозначение ключа, управляемого напряжением.



**Рис. 35. Обозначение ключа, управляемого напряжением**

Синтаксис: **Sxxx n1 n2 nc+ nc- <model> [on,off].**

Пример записи директивы управления ключом:

**.model Sw1 SW(Ron=.1 Roff=1Meg Vt=2 Vh=.5 Lser=10n Vser=.01).**

Напряжение между узлами nc+ и nc- управляет сопротивлением ключа между узлами n1 и n2. Параметры ключа, управляемого напряжением:

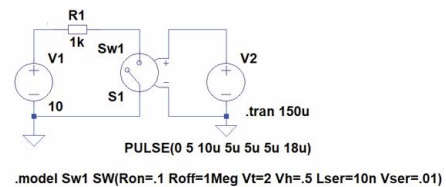
- **Ron** – сопротивление замкнутого ключа (по умолчанию 1 Ом)
- **Roff** – сопротивление разомкнутого ключа (по

умолчанию 1012 Ом)

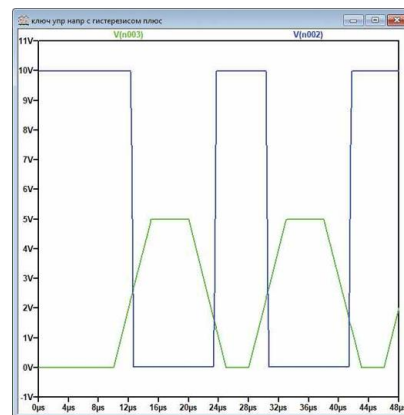
- **Vt** – пороговое напряжение (по умолчанию 0 В)
- **Vh** – напряжение гистерезиса (по умолчанию 0 В)
- **Lser** – индуктивность последовательной цепи замкнутого ключа (по умолчанию 0 Гн)
- **Vser** – падение напряжения на сопротивлении замкнутого ключа (по умолчанию 0 В)
- **ilimit** – максимальное значение тока через замкнутый ключ (по умолчанию не ограничен).

Ключ может работать в одном из трех режимов (аналогично токовому ключу): без гистерезиса, с положительным или отрицательным значением гистерезиса. При отрицательном значении напряжения гистерезиса сопротивление ключа изменяется плавно между своими крайними значениями.

Модель, иллюстрирующая работу ключа с гистерезисом, приведена на рис. 36, а временные диаграммы управляющего напряжения и выходного напряжения ключа – на рис. 37.

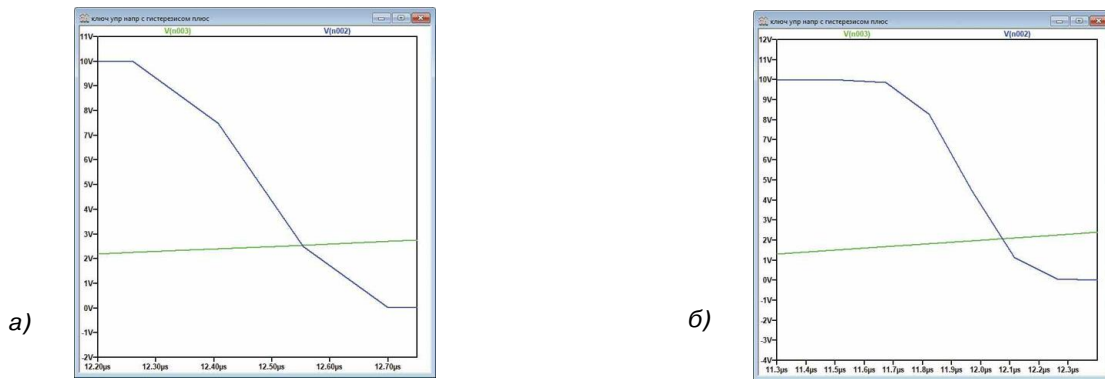


**Рис. 36. Модель для иллюстрации работы ключа, управляемого напряжением, при наличии гистерезиса**



**Рис. 37. Временные диаграммы управляющего напряжения (зеленая) и выходного напряжения ключа**

Чтобы заметить различия в работе ключа при положительном и отрицательном значении напряжения гистерезиса, на рис. 38 приведены временные диаграммы сигналов на выходе ключа в увеличенном масштабе по горизонтали.



**Рис. 38. Временные диаграммы работы ключа с положительным значением напряжения гистерезиса (а) и с отрицательным значением (б)**

Как следует из рис. 38, формы сигналов на выходе ключа при разных значениях хоть незначительно, но отличаются.

С другими возможностями программы LTSpice мы будем знакомиться в последующих публикациях.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в LTSpice.

Учебно-методическое пособие. Псковск. гос. политехн. ин-т. – Псков: Издательство ППИ, 2008. – 165 с.

2. Володин В. Я. LTSpice: компьютерное моделирование электронных схем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

3. <http://ltwiki.org/files/LTSpiceSupplementalDocumentation.pdf>.



## ТЕПЛОВИЗОР ДЛЯ ЭНЕРГОАУДИТА

### Fluke TiS40 – универсальный тепловизор для энергоаудиторов и энергетиков

**Расширенные функциональные возможности**

- термосенсор 160×120 пикселей
- диапазон измерений -20...350 °C
- тепловая чувствительность 0.09 °C, точность измерений ±2 °C
- цифровая фотокамера 5 Мпикселей
- фокусировка автоматическая нерегулируемая (от 0.45 м)
- угол обзора 35.7°×26.8°, отношение расстояние/размер объекта 252:1
- монитор 3.5 дюйма, 320×240 пикселей
- встроенная память 4 Гбайт + 4 Гбайт Micro SD
- технологии IR-Fusion® (совмещение снимков в видимом и ИК-диапазоне), PIP ("картинка в картинке"), AutoBlend™
- аккумулятор литий-ионный со светодиодным индикатором заряда, непрерывное время работы до 4 часов, время зарядки 2.5 часа
- адаптер сети переменного тока 100...240 В, 50/60 Гц
- программное обеспечение SmartView® (в комплекте поставки)
- язык меню: английский, русский и др. (18 языков)
- класс защиты корпуса IP54, вибростойкость 2g
- габаритные размеры 26.7×10.1×14.5 мм, масса (с аккумулятором) 0.72 кг

**Акционное предложение – поставка со склада в Киеве по сниженной цене!**

**VD MAIS – официальный дистрибьютор компании Fluke в Украине**

тел.: (044) 220-0101, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (032) 245-5478, (095) 274-6897, (048) 734-1954, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua